

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/382736579>

Audiologisch advies geluidsonderzoek en normering Windpark IJsselwind. In het kader van de beroepsprocedure bij de Raad van State.

Preprint · July 2024

CITATIONS

0

READS

434

1 author:



Leonard M.B. Baart de la Faille

27 PUBLICATIONS 13 CITATIONS

SEE PROFILE

<https://www.researchgate.net/publication/382736579>

Engelse versie: <https://www.researchgate.net/publication/384014517>

Audiologisch advies geluidsonderzoek en normering Windpark IJsselwind

In het kader van de beroepsprocedure bij de Raad van State.

Leonard M. B. Baart de la Faille, fysicus-audioloog

juli 2024

Op verzoek van omwonenden van het geplande windpark IJsselwind wordt een wetenschappelijke beoordeling gegeven met betrekking tot het akoestisch onderzoek en de normering. Deze tekst omvat fragmenten van een rapport in wording betreffende een samenhangende akoestische, audiologische en epidemiologische analyse van windturbinegeluid. De auteur is non-profit onafhankelijk onderzoeker en heeft geen persoonlijke belangen met betrekking tot het al dan niet plaatsen van windturbines of de normering hiervan.

Naar aanleiding van dit audiologisch advies is een beknopte analyse van Lden opgesteld:

**Jaargemiddelde geluidbelasting windturbines Lden
bij normering en dosis-effectrelatie.**

<https://www.researchgate.net/publication/383696379>

Inhoudsopgave

1 Hoofdconclusie.....	3
2 Aanbevelingen.....	3
3 Samenvatting.....	4
4 Perspectief.....	5
5 Validiteit van het akoestisch rekenmodel.....	7
5.1 Geluidproductie windturbine.....	8
5.2 Geluidvoortplanting.....	8
5.3 Invloed turbinehoogte.....	10
6 Amplitudemodulatie (AM).....	11
6.1 Conclusie AM.....	12
7 Laagfrequent geluid.....	12
7.1 Laagfrequent geluid: immissieberekening.....	12
7.2 Laagfrequent geluid: immissiemetingen Nederlandse en Duitse windparken.....	13
7.2.1 Nederlandse windparken.....	14
7.2.2 Duitse windparken.....	16
7.3 Laagfrequent geluid: dynamische hinderanalyse.....	17
7.4 Conclusies laagfrequent geluid.....	19
8 Tonaliteit.....	19
9 Jaarlijkse geluidsbelasting Lden.....	19
9.1 LdenE.....	19
9.2 LdenI.....	20
9.3 Lden en seizoensinvloeden.....	20
9.4 Lden en het (dis)continue karakter van windturbinegeluid.....	21
9.5 Lden-normering vergeleken met buitenlandse normen.....	22
9.6 Conclusie jaargemiddelde geluidbelasting Lden en Lnight.....	23
10 Validiteit van de doses-effectrelatie.....	23
10.1 Conclusies dosis-effectrelatie.....	26
11 Referenties.....	27

1 Hoofdconclusie

- Het is de stand van de wetenschap dat een betrouwbare berekening van geluidniveaus in de omgeving van windturbines niet mogelijk is. Dit impliceert dat:
 - Berekening van de immissie-Lden tevens onmogelijk is. Deze is bovendien niet geschikt als normerende variabele voor windturbinegeluid door de wisselende hinderincidentie, seizoensvariatie en de ongevoeligheid voor laagfrequent geluid, AM en tonaliteit.
 - Dosis-effectrelaties op basis van een *berekende* geluidbelasting zeer onzeker zijn. Duits onderzoek op basis van *gemeten* immissiewaarden komt tot een factor drie hogere hinderscore dan bij de Nederlandse norm.
 - Normering alleen mogelijk is op basis van begrensde immissieniveaus.
- De Nederlandse overheid stelt dat geluidbelasting nooit hoger kan zijn dan $L_{night} + 4$ dB, er is derhalve geen beletsel over te gaan op een LA_{max} -immissienormering. Deze is transparanter en eenvoudiger te handhaven. De zwakte van de ISO-9613 methode wordt op deze wijze omzeild en overmatige hinder in focusgebieden wordt voorkomen.
- Bij Nederlandse en Duitse windparken met moderne windturbines worden bij metingen tussen 400 – 1100 meter laagfrequent geluidniveaus gevonden die aanzienlijk boven de gehoordrempel liggen en ernstige hinder veroorzaken, equivalent aan 50 – 70 dB(A).
 - Hiermee worden de klachten van omwonenden bevestigd.
 - Normering op basis van een 'A'-weging (dB(A)) biedt geen bescherming tegen laagfrequente hinder. Daartoe is aparte aanvullende normering noodzakelijk.
 - Voor de Nederlandse windparken worden aanzienlijke overschrijdingen van de ISO-9613 berekeningen gevonden (laagfrequent: 7 dB, A-weging: 6 dB). In de literatuur worden nog hogere waarden vermeld.
- De door de overheid ingestelde structuur van voorgeschreven rekenmodellen, de eenvormigheid van beleidsadviezen die hier het gevolg van is, de beperkte distantie van het RIVM en het gebrek aan wetenschappelijke kennis en onderzoek, hebben geleid tot een landelijke kokervisie met betrekking tot de beoordeling van windturbinegeluid en de hinder die er het gevolg van is. Dit heeft grote consequentie voor de ontwikkeling van nieuwe normen.

2 Aanbevelingen

- De recent bepaalde Duitse dosis-effectrelatie voor hoge windturbines op basis van immissiemetingen is op dit moment het meest valide en verdient daarom aanbeveling als richtsnoer voor de normering.
- Een gecombineerde immissie-normering:
 - Op basis van LA_{max} (A-gewogen maximum aan de gevel).
 - Laagfrequent normering op basis van de ISO-28961- P10-drempelcurve.
 - AM-normering: een verlaging van LA_{max} - norm ter grootte van de modulatie diepte.
 - Normering voor tonaliteit: een verlaging van LA_{max} - norm van 5 dB (in voorkomende gevallen).
- Een dagelijkse nachtelijke stillegging van het windpark van enkele minuten om immissiemonitoring en handhaving te faciliteren.

3 Samenvatting

In dit advies wordt allereerst de wetenschappelijke achtergrond van de in Nederland gehanteerde akoestische rekenmethode besproken. Dit model is vastgelegd in het Activiteitenbesluit en valt in grote lijn samen met de internationale ISO-9613 standaard welke gevalideerd is voor industriële objecten van maximaal 30 meter hoogte, voor lage windsnelheden en tot een afstand van 1000 meter.

De afgelopen 15 jaar is er een aanzienlijk aantal wetenschappelijke publicaties verschenen waarin met moderne numerieke computermodellen en veldmetingen de geluidoverdracht rond windturbines wordt onderzocht. Deze onderzoeken wijzen op grote tekortkomingen van de ISO-9613 methode. Waar ISO-9613 uitgaat van een gelijkmatige verzwakking rondom de windturbine, bestaan er in de praktijk focusgebieden met hoge geluidniveaus. De geluidoverdracht is sterk afhankelijk van de turbinehoogte en het bijzondere meteorologisch fenomeen van de nachtelijke windmaxima (NWM) waarbij windturbinegeluid over grote afstanden wordt ‘gedragen’ (figuur 2).

In factsheets en reviews van het RIVM blijven deze wetenschappelijke ontwikkelingen vrijwel geheel buiten beschouwing. Dit heeft grote consequenties voor de beoordeling van hindereffecten en dosis-effectrelaties.

Amplitude modulatie (AM) is een belangrijke voorspeller van hinder en kan oplopen tot aanzienlijke wisselingen van het geluidniveau van zeker 10 dB. Mede uit Duits overheidsonderzoek blijkt dat AM niet op een eenduidige wijze samenhangt met geluidniveaus en zeer lokaal kan voorkomen. Hiermee wordt het standpunt van de Nederlandse overheid verworpen dat AM een vast en eenduidig onderdeel vormt van windturbinegeluid waardoor AM geen aparte normering zou behoeven. Normering van AM is van groot belang daar de toename van hinder equivalent is aan een verhoging van geluidbelasting oplopend tot 8 dB. Dit is equivalent aan meer dan een halvering van de turbine-afstand tot omwonenden.

In het advies wordt uitgebreid ingegaan op het belang van laagfrequentgeluid. De Nederlandse overheid concludeert ter voorbereiding van de nieuwe normstelling dat laagfrequentgeluid geen rol van betekenis speelt (rapport Peutz). Dit standpunt is echter gebaseerd op ISO-9613 berekeningen. In het advies worden metingen van drie Nederlandse en vijf Duitse windparken (400 tot 1100 meter) gepresenteerd die het tegendeel aantonen. Er worden aanzienlijke laagfrequent niveaus gemeten hetgeen in overeenstemming is met het eerder genoemde wetenschappelijk modelonderzoek. De gemeten niveaus zijn lokaal 7 dB hoger dan de berekende ISO-9613 berekeningen. Bij windpark N33 worden lokaal maximale breedbandniveaus gemeten 6 dB(A) boven de maxima die op grond van de normberekeningen verwacht worden.

Laagfrequent geluid leidt reeds direct boven de gehoordrempel tot hinder welke bij toenemende geluidsterkte zeer snel toeneemt (figuur 9). Dit is van doorslaggevend belang bij hinder van windturbinegeluid. De geconstateerde laagfrequent niveaus leiden tot hinder die equivalent is aan ‘gewoon geluid’ van 50 tot 70 dB(A). Dit is een zeer ernstige hinder en verklaart de klachten van omwonenden. Dit bevestigt dat een A-gewogen normering niet beschermt tegen laagfrequent hinder.

Tonaliteit resulteert in extra hinder welke kan oplopen tot een equivalente verhoging van het geluidniveau van 5 – 7 dB(A). Bij windpark N33 is gebleken dat normering van tonaliteit veel ellende had kunnen voorkomen.

In de bespreking van L_{den} wordt duidelijk dat dit geen zinvolle normeringsvariabele kan zijn.

- ◆ De berekening van L_{den} *ter plekke van de windturbine* (L_{denE}) heeft zeer beperkte betekenis doordat de turbinespecificaties geen inzicht geven in de (grote) effecten van turbulentie en variabele verticale windgradiënten op de geluidproductie.
- ◆ De berekening van L_{den} voor de immissie *op afstand van de windturbine* (L_{denI}) resulteert, in een zeer grote onzekerheidsmarge door het gebruik van de ISO-9613 berekening voor de geluidsoverdracht,
- ◆ De betekenis van L_{den} als dosismaat is beperkt door de ongevoeligheid voor:
 1. Seizoenseffecten en klimatologische omstandigheden met sterke invloed op hinder (figuur 10).
 2. Onregelmatig voorkomende nachtelijke windmaxima
- ◆ WHO 2018: ‘it may be concluded that the acoustical description of wind turbine noise by means of L_{den} or L_{night} may be a poor characterization of wind turbine noise and may limit the ability to observe associations between wind turbine noise and health outcomes.’⁴⁶
- ◆ De onbruikbaarheid van L_{den} als dosismaat impliceert dat alleen normering van maximale immissieniveaus (LA_{max}) tot een adequate bescherming kan leiden.

De Nederlandse overheid stelt, in de voorbereiding van nieuwe normen, dat de lokale geluidbelasting nooit hoger kan zijn dan $L_{night} + 4$ dB. Er is derhalve geen beletsel over te gaan op een immissienormering (LA_{max}). Deze is transparanter en eenvoudiger te handhaven. De problematiek van de zwakke ISO-9613 methode wordt op deze wijze omzeild en overmatige hinder in focusgebieden wordt voorkomen.

Voor de gebruikte TNO dosis-effectrelatie wordt aangetoond dat deze in grote mate wordt beïnvloed door de beperkingen van de geluidsberekeningen (ISO-9613) en verhult dat er lokaal rond windturbines grote afwijkingen voorkomen. Hindermetingen worden gerelateerd aan de afstand tot windturbines waardoor gebieden met ernstige hinder in focusgebieden vermengd worden met gebieden zonder veel hinder. De gemiddelde uitkomst is vervolgens gebruikt voor de normstelling. De dosis-effectrelatie is gebaseerd op lage windturbines van gemiddeld 70 meter ashoogte en kent een aantal methodologische tekortkomingen. De WHO beoordeelt de doses-effectrelaties waarop ook de Nederlandse normen zijn gebaseerd als zwak en wil er daarom geen normstelling aan verbinden.

In onderzoek door de Duitse overheid bij vijf windparken waar deze nadelen niet of veel minder een rol spelen, ligt het aantal ernstig gehinderden een factor drie hoger dan bij de in Nederland gehanteerde curve. Belangrijke oorzaak van dit verschil is het feit dat in het Duitse onderzoek is gebaseerd op immissiemetingen (figuur 11).

4 Perspectief

De Nederlandse overheid heeft in 2011 geluidnormen voor windturbines vastgesteld. Zij heeft daarbij eveneens vastgelegd hoe de diverse akoestische metingen en berekeningen dienen te worden uitgevoerd. De gegeven normering werd gebaseerd op onderzoek van TNO waarin een dosis-effectrelatie werd berekend.

Dit heeft er toe geleid dat berekeningen van de geluidbelasting op een eenduidige wijze plaatsvinden maar ook dat alle adviesbureaus gelijkvormige rapporten afleveren. Hierdoor is van een onafhankelijk oordeel van het onderzoek door de initiatiefnemer en dat van het bevoegd gezag al lang geen sprake meer. Van een wetenschappelijk oordeel, voor zover dat van een adviesbureau verwacht mag worden, is ook geen sprake. Men volgt het voorschrift van de overheid.

Naast de akoestische berekeningen wordt ook de dosis-effectrelatie als een absoluut vaststaand gegeven beschouwd. Dit leidt er toe dat aantallen gehinderden tot op een decimaal nauwkeurig worden berekend zonder de wetenschappelijke relevantie hiervan te bespreken. Noch de onzekerheden van de akoestische rekenmethode noch die van de dosis-effectrelatie komen in de adviesrapporten aan de orde. Dit leidt tot beleidsadviezen waarvan de zin ernstig moet worden betwijfeld.

Ook van de zijde van de overheid blijft het op deze punten stil. In een zeer dichtbevolkt land als Nederland waar, zonder internationaal precedent, zeer hoge windturbines worden geplaatst, mag meer initiatief voor wetenschappelijk onderzoek en verantwoording worden verwacht. Het RIVM krijgt weliswaar opdracht tot literatuurstudies doch deze zijn in hoge mate gelimiteerd tot epidemiologische studies die bovendien in beperkte mate representatief zijn voor de Nederlandse situatie.⁶² De akoestisch-auteur van de reviews was tevens de hoofdonderzoeker van het dosis-effectonderzoek uit 2007 en betrokken bij de ontwikkeling van de Lden-systematiek waarop de huidige praktijk gestoeld is.^{8,10,27} Hij is co-auteur van het Canada Health-onderzoek dat een prominente plaats inneemt in de wetenschappelijke discussie over gezondheidseffecten doch eveneens gebaseerd is op de oude akoestische modellen.^{65,66} Dit geldt ook de hoofdonderzoeker van het TNO dosis-effectonderzoek uit 2008.²⁹

De reviews, waarvan politiek en bestuur in grote mate afhankelijk zijn, zijn beslist zeer waardevol doch worden beperkt in zeggingskracht door te weinig distantie van de staande praktijk en de beperkte mate waarin wetenschappelijke ontwikkelingen op het gebied van windturbine-akoestiek en relevante audiologie hier bij betrokken worden.

De door de overheid ingestelde structuur van voorgeschreven rekenmodellen, de eenvormigheid van beleidsadviezen die hier het gevolg van is, de beperkte distantie van het RIVM en het gebrek aan wetenschappelijk onderzoek, hebben geleid tot een landelijke kokervisie met betrekking tot de beoordeling van windturbinegeluid en de hinder die er het gevolg van is. Dit heeft geleid tot veel hinder bij omwonenden die door de overheid veelal niet onderkend wordt. Het feit dat de provincie Zuid-Holland in verband met grote hinder de mogelijkheid onderzoekt tot stilstand van windpark Spui, is veelzeggend.⁵⁸

Sinds 2011 heeft het wetenschappelijk inzicht in de geluidproductie en geluidverspreiding van en door windturbines een enorme vlucht genomen. In het meest recente factsheet van het RIVM betreffende windturbinegeluid van enkele maanden geleden is hiervan echter niets terug te vinden en houdt men vast aan de inzichten uit het verleden. TNO heeft zich in 2008 bezig gehouden met de dosis-effectrelatie doch ook hier beperkte men zich tot de epidemiologie en wordt geen analyse gegeven van de betrouwbaarheid van de akoestische variabelen. TNO had in het verleden een wetenschappelijke audiologische afdeling die internationaal in hoog aanzien stond. Heden heeft zij een akoestische afdeling die zich onder meer met omgevingslawaai bezig houdt. Deze expertise wordt door de overheid niet (herkenbaar) aangewend.

Deze ontwikkelingen hebben er toe geleid dat de overheid zich bij de voorbereiding van nieuwe geluidnormen voor windturbines heeft moeten wenden tot de adviesbureaus. Dezelfde bureaus die voor de rapportage al jaren hetzelfde computerprogramma gebruiken en nog steeds uitgaan van de oude rekenvoorschriften. Dit resulteert er in dat ook bij de nieuwe normering nog gebruik wordt gemaakt van een rekenmethodiek uit de jaren 90. Een methodiek volgens ISO-9613 die is ontworpen voor industriële geluidbronnen van maximaal 30 meter hoogte en tot op een afstand van ten hoogste 1000 meter. Deze methode is niet gevalideerd voor windturbines en heeft een zeer beperkte zeggingskracht. Wel is het de enige beschikbare methode voor globale geluidsberekeningen die in diverse varianten beschikbaar is.

Voor het bepalen van jaargemiddelden zoals L_{den} is een valide berekening van de geluidbelasting nodig. Het ontbreken hiervan impliceert tevens dat een enigszins betrouwbare berekening van L_{den} voor windturbines niet mogelijk is. Nederland is, naast Noorwegen, het enige land waar de normering volledig afhankelijk is van de bepaling van L_{den} . Voor zover L_{den} bij normering in het buitenland een rol speelt wordt deze altijd gecombineerd met normen voor de daadwerkelijke geluidniveaus ter plekke van gevoelige objecten, de immissiewaarden. Hiermee wordt de onzekerheid van de geluidberekeningen ondervangen.

5 Validiteit van het akoestisch rekenmodel

Het akoestisch rekenmodel ISO-9613-2 is gevalideerd voor de geluidsverzwakking in benedenwindse richting onder gemiddelde weersomstandigheden bij een hoogstens matige windsterkte (< 5 m/s) en een maximale bronhoogte van 30 meter. Onder deze omstandigheden heeft het model een tolerantie van ± 3 dB.^{1,2} Het is evident dat voor moderne industriële windturbines tot 270 meter tiphoogte met uiteraard hoge windsnelheden, niet aan deze voorwaarden wordt voldaan. Het model gaat uit van een gelijkmatige geluidverdeling in alle richtingen en een langzaam afnemend geluidniveau met de afstand: circa 6 dB/afstandsverdubbeling.



Figuur 1: Illustratie huidige rekenmethode voor geluidcontouren:

- ◆ Geleidelijke cirkelvormige verzwakking van turbinegeluid.
- ◆ Houdt geen rekening met de afbuigingsverschijnselen die resulteren in locale focusgebieden met hoge geluidniveaus.

5.1 Geluidproductie windturbine

Geluidproductie van een windturbine ontstaat zowel door mechanische als door wind veroorzaakte effecten. De mechanische geluidproductie is een zeer complex proces en wordt beïnvloed door de akoestische eigenschappen van van de de vele onderdelen tot aan de spanning van bouten toe.⁴⁴ Het kan leiden tot tonale hinder. De interactie tussen invallende wind en de draaiende rotor resulteert in diverse soorten geluid met verschillende geluidspectra. Geluid ten gevolge van turbulenties en stall (wind die niet ‘glad’ intreedt bij het rotorblad) bestaat voornamelijk uit lage frequenties beneden 250 Hz en vooral beneden 125 Hz.^{3,4}

De fabrieksgegevens van een windturbine die de basis vormen van ISO-9613-berekeningen worden bepaald onder neutrale condities met weinig turbulentie of ‘stall’ hetgeen resulteert in een onderschatting van laagfrequent geluid. Mitigerende maatregelen zoals het aanbrengen van speciale profilering van het rotorblad (serrations, airfoiles) hebben vaak onbedoelde gevolgen. Het algehele A-gewogen geluidniveau vermindert doch laagfrequent geluid, het meest hinderlijke deel, wordt juist verhoogd.³ Voor de verschillende geluidmodes die door middel van aanpassing van de rotorstand tot een lagere geluidproductie leiden, kan dit eveneens het geval zijn. Al deze effecten blijven bij de bronsterktebepaling buiten beschouwing en worden bij ISO-9613 niet meegewogen, terwijl zij juist onder niet-neutrale meteorologische omstandigheden een grote invloed hebben. Mitigerende maatregelen zijn bedoeld hinder te verminderen, feitelijk neemt deze juist toe.

Een sterk afwijkende situatie voor de geluidproductie treedt op bij een zeer stabiele atmosfeer en in het bijzonder bij een nachtelijk windmaximum (NWM), ook wel Low Level Jet (LLJ).^{5,6,7} Een zeer stabiele atmosfeer in de nacht komt gemiddeld in Nederland eens per drie dagen voor, in de winter minder (20%), in de zomer zeer vaak (48%).⁸ Volgens een striktere definitie komt het NWM in Nederland op ca. 20 % van dagen in de avond, nacht en vroege ochtend voor.⁹

De NWM ontstaan wanneer bij een heldere hemel het aardoppervlak afkoelt en de turbulentie en daarmee de koppeling tussen luchtlagen afneemt. Deze ont koppeling vermindert de afremming van winden tussen de 140 en 260 meter. Deze winden nemen daardoor in kracht toe en komen sterker onder invloed van corioliskrachten die het gevolg zijn van de aardrotatie. Dit resulteert in krachtige winden met een winddraaiing van gemiddeld 35 graden.^{9,10} Ter hoogte van deze overgang treden sterke turbulenties op die resulteren in grote windsnelheidsfluctuaties. In verloop van 10 minuten treden op deze hoogte windsterktewisselingen op van ca. 30 % met een gierend geluid van windturbines als gevolg. De turbulentie en windschifting van ca. 35 graden resulteren in een toename van laagfrequent geluid (instroomgeluid en stall <200 Hz, vooral <130 Hz).^{11,12} Genoemde effecten leiden mede tot het ritmisch karakter van windturbinegeluid ofwel amplitude modulatie (AM).

Doordat de bronmeting van het windturbinegeluid plaatsvindt bij een neutrale atmosfeer worden genoemde effecten niet in berekeningen meegenomen. Dit betekent onder meer dat belangrijke (spectrale) afwijkingen van het gemiddelde geluid niet worden betrokken bij berekeningen aan windturbinegeluid zoals bijvoorbeeld bij de bepaling van Lden.

5.2 Geluidvoortplanting

De verspreiding van geluid rondom een windturbine is zeer richtinggevoelig.

In de *tegenwind*-richting wordt geluid door de wind sterk afgebogen, zowel omhoog, opzij als omlaag. Hierdoor ontstaat, als bij een lens, een concentratie van geluidgolven aan de grond: de ‘focuszone’ met verhoogde geluidsniveaus.

Bij een turbine met een ashoogte van 80 meter begint de focuszone op ongeveer 200 meter afstand en bij een ashoogte van 150 meter op zo’n 600 meter afstand. Bij ashoogte 80 meter is na ongeveer 700 meter al het aanvankelijk omlaag gerichte geluid aan het grondoppervlak gereflecteerd en ontstaat er een ‘schaduwzone’ zonder direct turbinegeluid.^{13,14,15} Bij een ashoogte van 160 meter begint de schaduwzone op ca. 1400 meter.

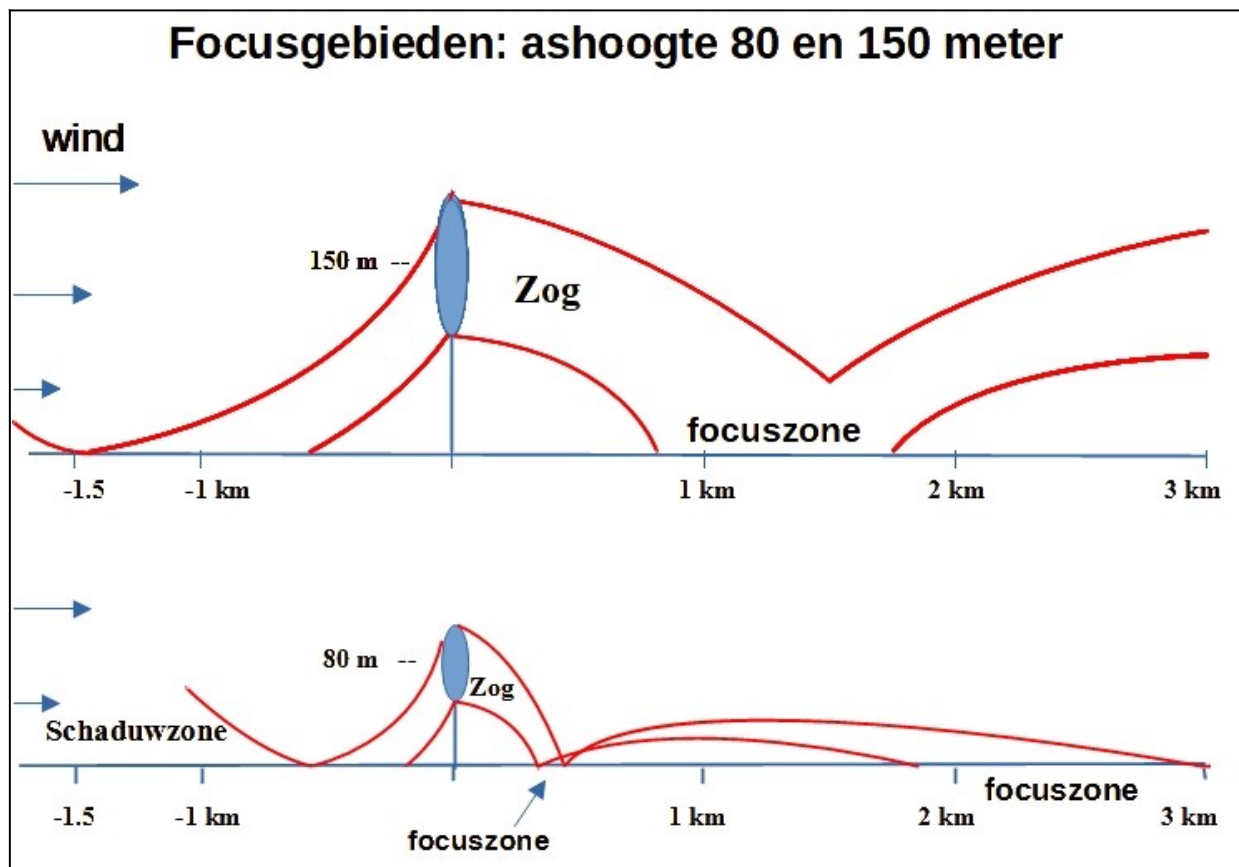
Het spectrum van het turbinegeluid is zowel in de focuszone als in de schaduwzone door afbuigingseffecten zeer plaatsafhankelijk.

In figuur 2 is schematisch de focuszone en het schaduwgebied voor een windturbine met ashoogte van respectievelijk 80 meter en 150 meter weergegeven.

In de *windrichting* ontstaat achter de turbine-rotor een zog (‘wake’) dat het geluid min of meer horizontaal in de windrichting geleid. In het zog is de windsnelheid lager dan eromheen. Dit resulteert in een tunneleffect (‘piping’, ‘ducting’ of ‘trapping channel’). Het geluid wordt door de hogere windsnelheden rondom het zog steeds naar binnen gebogen en zit als in een pijp gevangen en verplaatst zich zonder veel energieverlies naar de ‘uitgang’. De lengte van het zog hangt sterk samen met de meteorologische omstandigheden. Hoe harder de wind en hoe zwakker de turbulentie des te langer is het zog.^{16,17}

Na het zog zorgt de relatief sterke wind aan de bovenzijde voor een neerwaartse buiging van het geluid. Deze wordt nog versterkt doordat weinig turbulentie vaak samen gaat met een temperatuurinversie (positieve gradiënt) die eveneens een neerwaartse afbuiging veroorzaakt. Zo ontstaan er in een focuszone downbursts die resulteren in verhoogde geluidsniveaus waarvan het spectrum plaatsafhankelijk is.¹⁴

In het kwadrant van de *dwarswind-richting* is het geluidsniveau aanzienlijk lager, globaal zo’n 6 dB, doordat er geen focuseffecten optreden en geluid in de windrichting afbuigt.¹⁸ Wel bestaat er door de akoestische eigenschappen van de rotor een uitstraling in het rotorvlak, dus dwars op de windrichting.



Figuur 2: Principeschets focusgebieden bij neutrale atmosfeer voor lage en hoge windturbines. Locatie van focusgebieden is sterk afhankelijk van nachtelijke windmaxima (NWM), windkracht en turbulentie.

Het Activiteitenbesluit gebaseerd op ISO-9613 houdt met al deze effecten geen rekening. Focusgebieden met hoge geluidsniveaus en ernstige hinder worden daarom niet onderkend.

NB: Afbuiging is vertekend door verticale schaalvergroting

Er is inmiddels wetenschappelijk brede consensus dat, vooral onder meteorologisch stabiele omstandigheden zoals bij de NWM, er grote afwijkingen van het conventionele akoestisch rekenmodel ontstaan.^{1,17,19/m,26} Met name de invloed van verticale profielen voor temperatuur, windsterkte en windhoek blijken van groot belang. Deze afwijkingen ontstaan zowel op niveau van de geluidproductie als tijdens de geluidvoortplanting. De hoogste geluidsniveaus treden op in en achter het gebied van het zog (focuszone) bij het NWM. Geheel tegen de prognoses van het klassieke rekenmodel worden deze effecten tot op grote afstand van windturbines gemeten. Op ruim 3 km afstand worden verschillen met het huidige model van 6 dB gevonden. Het geluidsniveau aldaar kan is dus grofweg gelijk aan het klassiek berekende niveau voor 1500 meter.¹¹

5.3 Invloed turbinehoogte

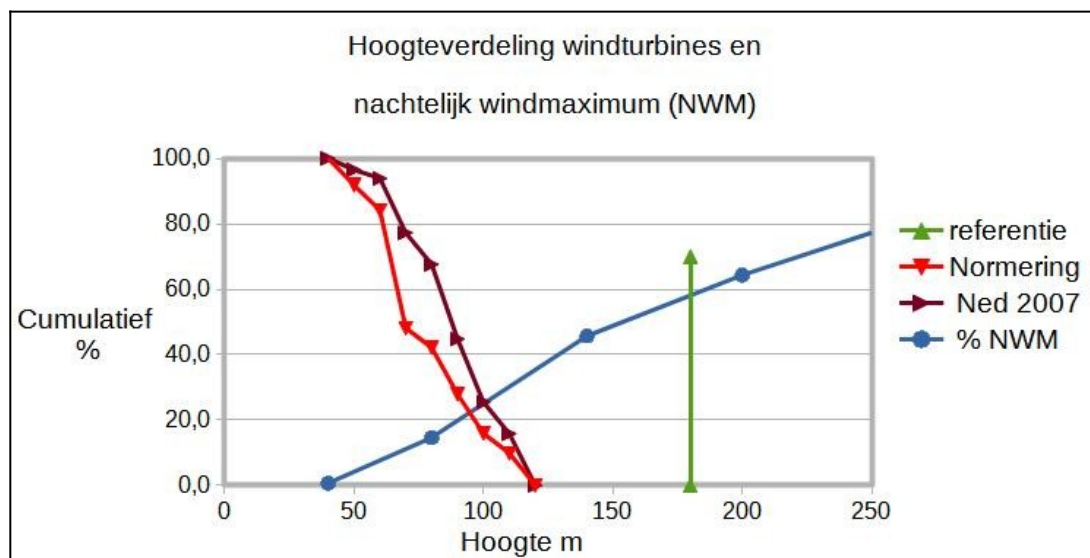
De turbine hoogte is bepalend voor de geluidoverdracht (figuur 2) en speelt daardoor ook een belangrijke rol bij de validiteit van de dosis-effectrelatie die de basis vormt van de normering. Een belangrijk verschil tussen lage en hoge turbines wordt bepaald door het effect van NWM. De rotor van een moderne turbine bevindt zich in de luchtlagen waarin de NWM maximaal zijn (150 meter).⁹ Aan de grond is er weinig wind of windstilte. De oudere generatie windturbines met

een ashoogte van 40 tot 80 meter bevinden zich in een tussenzone.^{16/m24,26,27} De aanzienlijke invloed van NWM op de geluidproductie en geluidvoortplanting heeft dus vooral effect bij de hoge windturbines. In figuur 3 wordt dit geïllustreerd. Het geeft informatie van het KNMI over de cumulatieve verdeling van de hoogte waarop NWM's voorkomen, gemeten over een periode van 7 jaar.^{27,28} Tevens wordt de cumulatieve verdeling (afnemend) gegeven van de ashoogten uit het Nederlands onderzoek van 2007 en Zweeds onderzoek uit 2000 en 2005, die samen de basis vormen van de Nederlandse normering.^{27,29,30} Bij het Zweeds onderzoek uit 2000 waren lage windturbines betrokken met een maximale hoogte van 40 - 50 meter, bij het onderzoek uit 2005 was dit rond 60 meter. De gemiddelde ashoogte bij het Nederlandse onderzoek bedroeg 80 meter (n=114), voor de drie normeringsonderzoeken samen was dit 70 meter.

Verticaal staat de cumulatieve verdeling van nachtelijke windmaxima bij toenemende hoogte (horizontaal). Tevens is weergegeven de cumulatieve verdeling van het aantal turbines (n=114) als functie van de *afnemende* ashoogte. De mate waarin de beide cumulatiecurven elkaar overlappen geeft inzicht in de kans dat bij de betrokken windturbines NWM's voorkomen. De totale kans hiertoe voor oudere lage windturbines is evident laag.

In de figuur is als referentie tevens de hoogte van een moderne turbine met ashoogte van 180 meter aangegeven. De rotor van deze turbine bevindt zich midden in de luchtlagen met de meeste kans op NWM.

De figuur maakt duidelijk dat het dosis-effectonderzoek, dat ook nu nog de basis vormt van de nieuwe overheids normen, niet maatgevend is voor de huidige generatie windturbines.



Figuur 3: Cumulatieve kans op **nachtelijke windmaxima (NWM)** en de ashoogteverdeling van windturbines uit het dosis-effectonderzoek Nederland 2007 en twee Zweedse onderzoeken (2000, 2005) die samen de basis vormen van de **Nederlandse normering**.^{27,29,30}

Referentie: **moderne turbine: ashoogte = 180 meter** (planMER Nederlandse normering)

Figuur laat zien dat moderne windturbines (groen) veel gevoeliger zijn voor nachtelijke windmaxima (blauw). Dit wordt bij de normering (rood) niet meegewogen.

Het Zweedse onderzoek vermeldt alleen globale maximale ashoogten: voor 2000 is dit 40-50 m voor 2005 ca 60 m. Voor het Nederlandse onderzoek zijn gedetailleerde gegevens beschikbaar. Gemiddelde ashoogte bij het normeringsonderzoek bedraagt 70 m.

6 Amplitudemodulatie (AM)

Amplitudemodulatie (AM) is de belangrijkste bron van hinder van het turbinegeluid.^{31,32} AM staat voor wisselingen van de geluidintensiteit. Door modelonderzoek komt er steeds meer inzicht in het ontstaan van AM met een aan de rotatiesnelheid gerelateerde modulatiefrequentie van ca. 1 Hz. Er spelen verschillende mechanismen. AM is sterk afhankelijk van de turbinehoogte en rotorspan.

De mate van amplitudemodulatie (modulatiediepte) wisselt en is vooral afhankelijk van de windsnelheid en meteorologische omstandigheden. Een kleine AM vlak bij de turbine kan zich, afhankelijk van de geluidsoverdracht, ontwikkelen tot een sterke modulatie die per richting en afstand varieert.^{33,16} AM in pandig gemeten komt iets minder vaak voor dan aan de gevel maar de modulatiediepte kan dan wel groter zijn dan buiten. Binnenshuis wordt meer AM-hinder gerapporteerd dan buiten.³⁴

Onder meer bij de nachtelijke windmaxima is de AM maximaal met gemeten modulatiediepte tot 10 dB en kan op grote afstand (meer dan 2,5 km) hoorbaar zijn en tot hinder leiden.^{12,35} Ook modelonderzoek wijst uit dat tussen 1 - 2 km zeer heftige modulaties voorkomen met een modulatiediepte van 9 dB. Dit in tegenstelling tot de situatie overdag waarbij meestal maximaal zo'n 5-6 dB modulatiediepte wordt gevonden.^{16,11} Bij metingen gedurende een jaar aan drie verschillende windparken in Australië wordt op 3,5 kilometer op 50 % van de nachten AM gemeten, op afstanden tot 1,3 kilometer loopt dit op tot 60 % van de nachten. Het belang van de nachtelijke AM wordt onderstreept door onderzoek waarin 's nachts 2 tot 5 keer vaker AM werd gemeten dan overdag en vooral onder NWM condities. Deze AM is vooral laagfrequent, <250 Hz. De frequentie van voorkomen wordt in hoge mate beïnvloed door lokale en klimatologische omstandigheden.^{36,37} Lokale omstandigheden kunnen leiden tot het voorkomen van AM in (vooral) de windrichting, op andere plaatsen alleen in tegenwind terwijl ook de AM in de dwarswindrichting zeer wisselend kan voorkomen. Alle mengvarianten kunnen voorkomen.³⁴

Het auditieve systeem is in hoge mate gevoelig voor kleine amplitudevariaties. Een zeer functionele eigenschap omdat deze bij spraakverstaan een belangrijke rol spelen.

AM heeft een negatief effect op de ervaren hinder en wordt in toenemende mate gezien als de belangrijkste bron van hinder.^{37,34,31,32} Ook in Nederland wordt dit door omwonenden gemeld, onder andere bij windpark Het Spui waar dit ook bij geluidsonderzoek werd vastgesteld.³⁸

Uit recent onderzoek van de Duitse overheid bij een aantal windparken blijkt dat de aanwezigheid van AM de belangrijkste voorspeller is van hinder, belangrijker dus dan het algemene geluidsniveau.³⁴ De mate van hinder ten gevolge van AM kan uitgedrukt worden in een equivalente verhoging van de geluidbelasting. Op deze wijze uitgedrukt kan AM-hinder oplopen tot een overeenkomstige verhoging van de geluidbelasting tot 8 dB. Deze hinder is dus equivalent aan een virtuele halvering van de afstand tot de windturbine.^{35,39,40,41,42} Dus een turbine met heftige AM lijkt op minder dan halve afstand te staan.

De mate van hinder wordt voornamelijk bepaald door de modulatiediepte, modulatiefrequentie, het laagfrequente deel van het spectrum en de mate waarin het turbinegeluid varieert door bijvoorbeeld wisselende windsterkte en windrichting of windstoten. Bij laboratoriumonderzoek worden indicaties gevonden dat de mate van slaapverstoring vooral gerelateerd is aan de modulatiediepte.⁴³

De normering van windturbines wordt gebaseerd op Lden, de jaarlijkse geluidbelasting. Voor het beteugelen van hinder is het dus van belang dat Lden ook voor hinder ten gevolge van AM een representatieve maat is. De amplitudemodulatie heeft echter nauwelijks effect op het algemeen A-gewogen geluidsniveau waardoor de sensitiviteit van Lden voor AM nihil is.

6.1 Conclusie AM

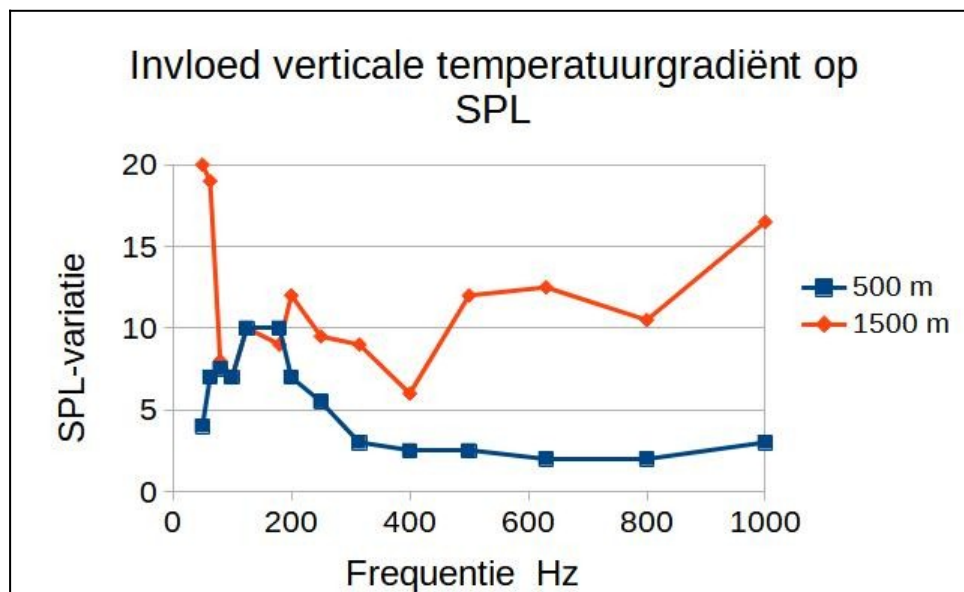
Gezien de aanzienlijke hinder ten gevolge van AM die niet eenduidig samenhangt met L_{den} , is een aparte normering noodzakelijk. Deze kan op verschillende manieren worden gerealiseerd. Meestal komt dit neer op een verlaging van de norm met 1 – 7 dB, afhankelijk van de lokaal gemeten modulatie diepte.^{37,39}

7 Laagfrequent geluid

Voor een beoordeling van de rol van laagfrequent windturbine geluid bij hinderklachten moet allereerst worden vastgesteld in hoeverre de lage frequenties waargenomen kunnen worden. In de praktijk gebeurt dat door òf op basis van het bronvermogen van de windturbine het geluidsniveau aan immissiezijde te *berekenen* òf door de feitelijke immissie niveaus te *meten*.

7.1 Laagfrequent geluid: immissieberekening

De grote tekortkoming van ISO-9613 rekenmethode, die in Nederland wordt gehanteerd kan worden geïllustreerd aan de hand van veldmetingen binnen het Franse Pibe-project, waarbij met behulp van een numeriek model de invloed van diverse variabelen wordt onderzocht. In figuur 4 is de invloed van de verticale temperatuurgradiënt op de laagfrequent geluidoverdracht op 500 en 1500 meter afstand weergegeven voor een turbine met een ashoogte van 80 meter.⁴⁸



Figuur 4: Afwijkingen van geluidsberekening Activiteitenbesluit (ISO-9613) t.g.v. van variaties van de verticale temperatuurgradiënt.⁴⁸

De figuur laat zien dat vooral voor lage frequenties de geluidoverdracht sterk beïnvloed wordt door het verticale verloop van de temperatuur. De invloed van de temperatuurgradieënt leidt op 1,5 kilometer afstand van de windturbine zelfs tot zeer aanzienlijk verhoogde geluidniveaus.

7.2 Laagfrequent geluid: immissiemetingen Nederlandse en Duitse windparken.

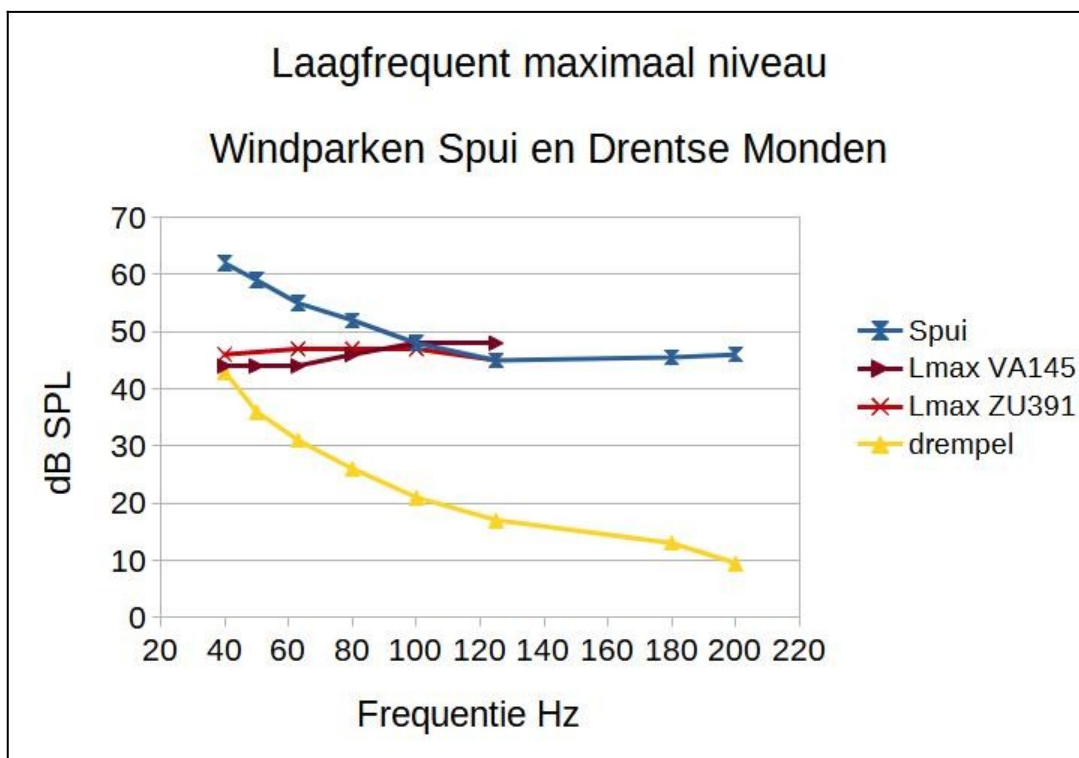
In onderzoek van de Nederlandse overheid wordt, op basis van ISO-9613 berekeningen, geconcludeerd dat windturbine geluid voor de lage frequenties niet of nauwelijks boven de gehoordrempel komt en derhalve klachten niet kan verklaren.⁴⁹

Bij de beoordeling van meetgegevens wordt meestal uitgegaan van gemiddelden over een groot aantal metingen. Er zijn goede audiologische redenen, die later aan de orde komen, om niet de gemiddelden maar de *maximale* geluidniveaus te bepalen. Van drie Nederlandse windparken zijn meetgegevens bekend. Voor windpark N33 zijn gemeentelijke metingen beschikbaar terwijl voor de windparken Spui en Drentse Monden evaluatieonderzoek plaatsvond door adviesbureaus naar aanleiding van klachten van omwonenden. Omwonenden van de drie windparken hebben vooral klachten over laagfrequent geluid. Voor alle drie windparken werd bij onderzoek bevestigd dat deze aan de regelgeving voldoen.

De Duitse overheid deed onderzoek naar vijf windparken waarvan gedetailleerde gegevens werden gepubliceerd.³⁴

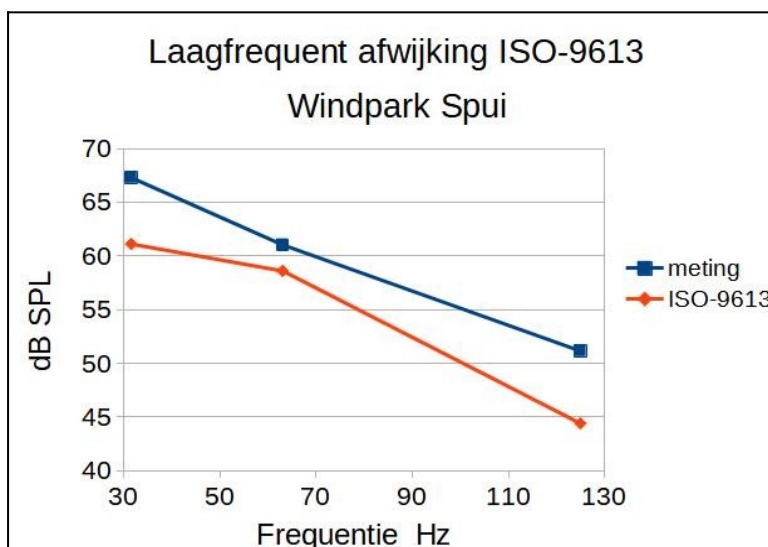
7.2.1 Nederlandse windparken

Windpark De Drentse Monden en Oostermoer: dit park bestaat uit totaal 42 turbines met ashoogte 145 meter en tiphoogte 210 meter. Bij diverse woningen rond het windpark zijn voorafgaand en na realisatie van het park metingen verricht.⁵⁰ Er worden rond 125 Hz aanzienlijke hogere geluidniveaus gevonden (8 – 9 dB) ten opzichte van de modelberekening uit de vergunning. Bij de beoordeling van de meetgegevens in de rapportage oordeelt men op basis van *gemiddelde* waarden dat er geen duidelijke verklaring is voor de klachten. In figuur 5 zijn de laagfrequent *maximale* waarden L_{\max} voor twee immissielocaties uit de bijlage van het meetrapport weergegeven. VA145 ingeklemd tussen twee lijnopstellingen, zowel ten noorden als ten zuiden op 1100 meter en binnen de L_{den} -contour van 41 dB(A). ZU391 ten noorden van het einde van een lijnopstelling op 900 meter met L_{den} van 42 dB(A).



Figuur 5: Windparken Spui; Oostermoer en Drentse Monden.
Maximaal laagfrequent geluidniveau en gehoordrempel (ISO-28961- P10) Bron:^{50,51}

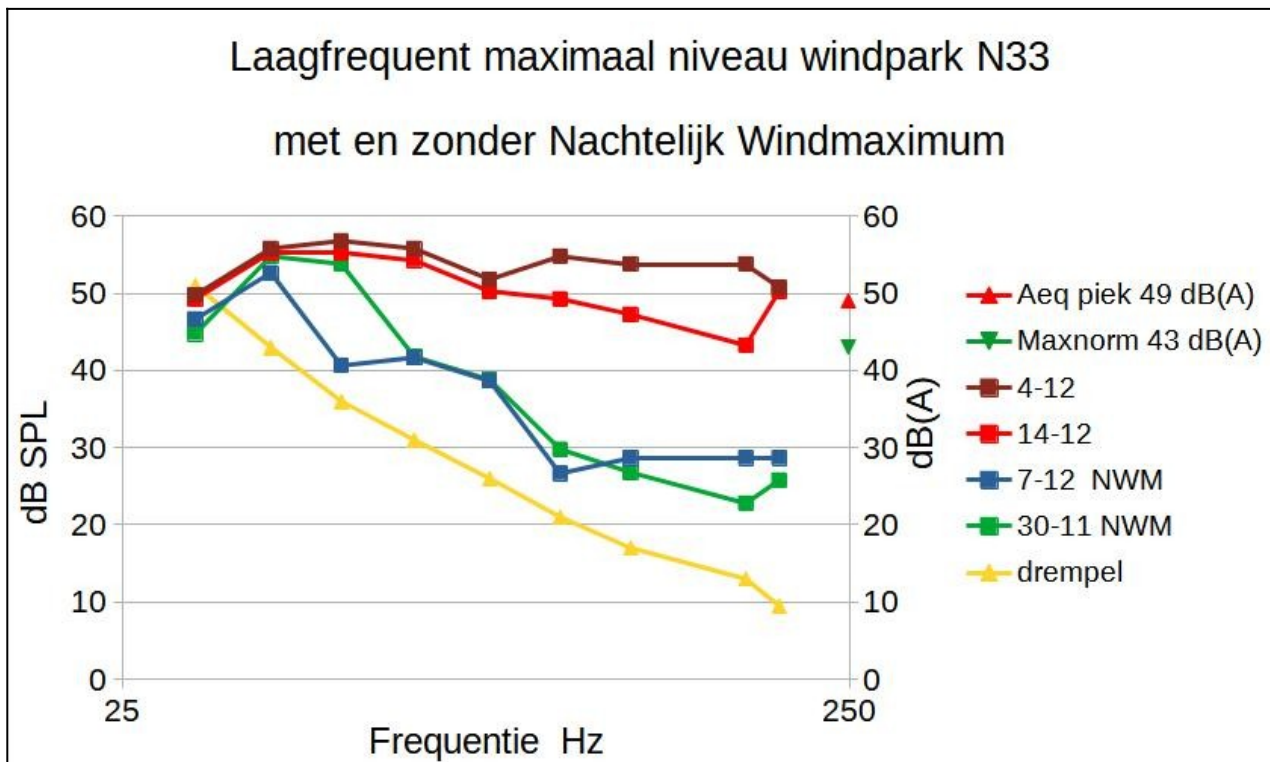
Windpark Spui: Vijf turbines van 4,2 mW in lijnopstelling, met ashoogte 135 meter en tiphoogte 198 meter. Op een aantal locaties zijn metingen verricht.⁵¹ In figuur 5 zijn laagfrequent *maximale* immissiewaarden $L_{\max,10,\min}$ voor locatie Oudendijk 13 Nieuw-Beijerland weergegeven in het verlengde van de lijnopstelling op 410 meter van het windpark. Opvallend zijn de zeer hoge niveaus voor de allerlaagste frequenties. Voor de drie lage octaaffrequenties wordt een overschrijding tot 7 dB van de in de rapportage gegeven ISO-9613 berekening gevonden, zie figuur 6. Voor de drie meetlocaties van windpark Spui liggen de 'A'-gewogen maximale waarden 3 tot 7 dB boven de ISO-9613 berekening. De onderzoekers geven windgeruis als verklaring. Deze verklaring is echter niet toereikend gezien het feit dat de overschrijding ook op een windluwe locatie 5 dB bedraagt, de metingen zijn verricht bij weinig wind aan de grond en de hoge laagfrequent niveaus waarbij de invloed van windgeruis op de meting beperkt is, is. De gemeten overschrijdingen zijn een bevestiging van de besproken beperkingen van de ISO-9613 methodiek.



Figuur 6: Gemeten afwijking van berekende geluidniveaus volgens het Activiteitenbesluit (ISO-9613) Bron:⁵¹

Windpark N33: De gemeenten Veendam, Midden Groningen en Oldambt hebben voor dit windpark zowel voorafgaand als na het gereedkomen, diverse immissiemetingen verricht.⁵² In dit advies worden de beschikbare meetresultaten uitgewerkt voor het zuidelijk deel van het windpark met 4 turbines van 4,3 mW (Siemens Gasema DD-130, ashoogte van 135 meter en tiphoogte 198 meter) op 725 meter afstand.

In de figuur worden de meetresultaten weergegeven voor 2 dagen mét en 2 dagen zónder NMW-condities. Op dagen met een NWM wordt een duidelijke piekvorming gezien bij de allerlaagste frequenties, gevolgd door een dip rond 100 – 200 Hz en zijn er hogere niveaus bij midden frequenties dan in de niet-NWM situatie (niet in deze figuur zichtbaar). Ondanks de laagfrequent piek is bij NWM de L_{Ceq} ca. 10 dB lager dan op dagen zonder NWM, terwijl het L_{Aeq} maximum toch hoog kan zijn (49 dB(A), dat is 6 dB boven de ISO-9613 berekening). Kennelijk is, conform de verwachting, vooral de focuszone voor lage frequenties verschoven naar grotere afstand tot de turbine terwijl bij de stabiele atmosfeer de verstrooiing laag is. Een interessant gegeven voor verder onderzoek. De metingen bevestigen dat de geluidoverdracht sterk afhankelijk is van de meteorologische condities en in sterke mate frequentie-afhankelijk.



Figuur 7: Invloed nachtelijk windmaximum (NWM) op geluidsoverdracht Windpark N33-Zuid

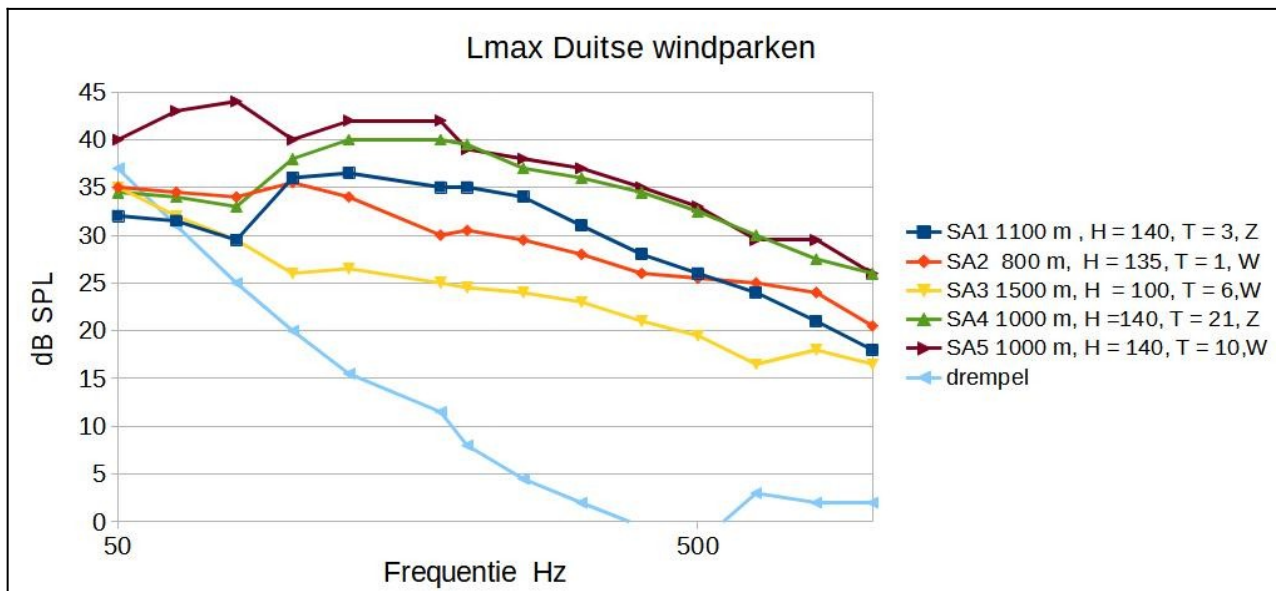
Afwijking gemeten maximum t.o.v. berekende maximum: overschrijding = 6 dB(A)

Gehoordrempel: ISO-28961-P10 curve

Bron geluidmetingen:⁵²

7.2.2 Duitse windparken

In een groot onderzoek door de Duitse overheid werden bij vijf windparken immissiemetingen gedaan.³⁴ In de rapportage worden gedetailleerde gegevens gepubliceerd op basis waarvan ook maximale immissiewaarden kunnen worden bepaald. De geografische omstandigheden zijn voor de verschillende windparken zeer divers en per windpark meest sterk gevarieerd. Dat maakt de akoestische overdracht tussen windpark en immissiemeetlocatie eveneens sterk gevarieerd. Dit temeer daar de wisselende terreinomstandigheden ook grote invloed hebben op de relevante micro-meteorologische variabelen. In vergelijking hiermee is het landschap rond de Nederlandse windparken vlak en gelijkmatig. Figuur 8 geeft Lmax voor de vijf windparken, tevens wordt respectievelijk de afstand tot het immissiemeetpunt, turbine ashoogte, aantal turbines en het meetseizoen (zomer/winter) weergegeven. Opvallend is dat de twee grote windparken SA4 en SA5, beiden op 1000 meter en gelijke grote ashoogte (140 m) sterk verschillen in de laagfrequent geluidsoverdracht (11 dB) terwijl de overdracht voor hogere frequenties gelijk is.



Figuur 8: H: ashoogte, T: aantal turbines, Z: zomer, W: winter; gehoordrempel ISO-28961-P10

Onderzoek Duitse overheid³⁴: maximale geluidniveaus windparken SA1 – SA5

Op basis van de metingen aan de Nederlandse en Duitse windparken kan geconcludeerd worden dat laagfrequent turbinegeluid vanaf ca. 30 - 40 Hz hoorbaar is. Voor windpark Spui, met de kortste afstand tot bebouwing is er reeds bij 40 Hz een aanzienlijke overschrijding van de gehoordrempel.

7.3 Laagfrequent geluid: dynamische hinderanalyse

In het onderzoek van de Nederlandse overheid, gebaseerd op model berekeningen (ISO-9613) (paragraaf 5.1) worden de berekende immissiewaarden vergeleken met de 'Vercammencurve'.^{49,53} Dit is een indicatieve curve die op basis van praktijkervaring een grensniveau aangeeft waarboven laagfrequente hinder verwacht mag worden. De dosis-effectrelatie die hiervoor gebruikt is dateert uit het pré-windturbine tijdperk en had voornamelijk betrekking op industrieel of huiselijk continu laagfrequent geluid.

Voor laagfrequent geluid bestaan er relatief grote inter-individuele verschillen. TNO heeft in de jaren 90 een drempelcurve opgesteld voor de leeftijdsgroep 55+.⁵⁴ Reden hiervoor was dat in deze leeftijdscategorie relatief vaak klachten voorkomen over laagfrequent geluid in de dagelijkse omgeving. Windturbines speelden hierbij nog geen rol. De meest lage drempel geldig voor ten minste 10% van de populatie staat bekend als de NSG-curve. (Nederlandse Stichting voor Geluidshinder.

De in veel Nederlandse rapportages over windturbinegeluid gebruikte Vercammencurve of NSG-curve geeft geen inzicht in hoeverre er sprake is van hinder. Meestal wordt, zonder verdere onderbouwing, geoordeeld dat de ondervonden laagfrequent hinder niet verklaard kan worden omdat genoemde curven niet of nauwelijks worden overschreden.

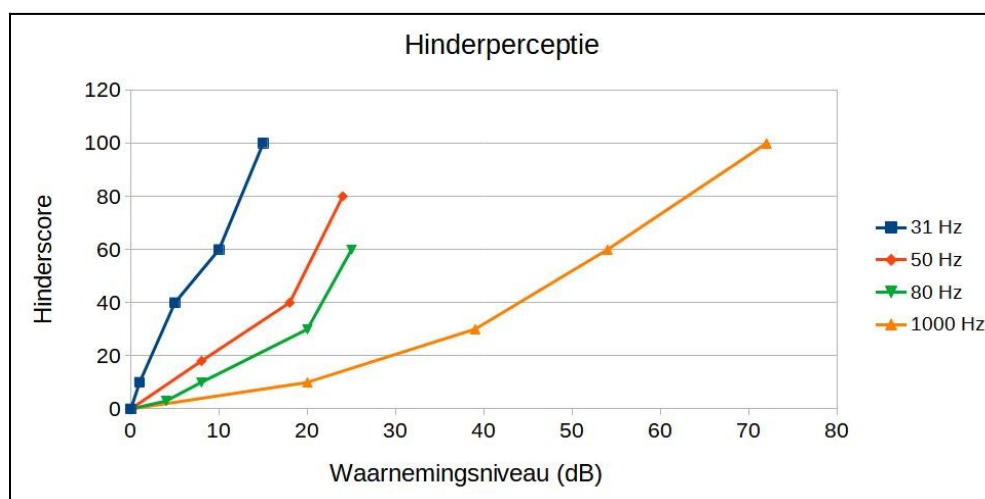
Voor het bepalen van mogelijke hinder moet beoordeeld worden in hoeverre laagfrequent turbinegeluid kan worden waargenomen en vervolgens moet worden nagegaan hoe hinderperceptie boven de gehoordrempel zich ontwikkelt. In de figuren in deze paragraaf wordt de gehoordrempel weergegeven volgens ISO-28961 (P10 percentiel).

Bij beoordeling van hinder wordt er in de normering aan de hand van L_{den} of hieraan verwante variabelen van gegaan dat er geen speciale aandacht nodig is voor laagfrequent turbinegeluid. De gedachte hierbij is dat de toegepaste 'A'-weging de gevoeligheid van het menselijk gehoor afdoende weerspiegelt zodat één intensiteitsmaat volstaat. Lage frequenties leveren in de 'A'-weging een kleinere bijdrage omdat de gehoordrempel hier ook hoger is dan voor middenfrequenties.

Bij deze benadering wordt echter geen rekening gehouden met de grote dynamiekverschillen van het gehoor tussen lage en hoge frequenties.

Voor lage frequenties is het dynamisch bereik (gehoorspan), het intensiteitsverschil tussen gehoordrempel en de pijndrempel, aanzienlijk kleiner dan bij middenfrequenties. De luidheid voor lage frequenties neemt, bij oplopend geluidniveau, ongeveer tweemaal sneller toe. Hinder neemt nog sneller toe.

Allereerst wordt hier (figuur 9) de laagfrequente hinderperceptie uit beschikbare literatuurgegevens weergegeven.⁵⁵ Daarbij zijn de SPL-waarden geconverteerd naar waarnemingsniveau boven de gehoordrempel (SL). In de figuur is goed te zien dat bij *afnemende* frequentie de hindercurve (hinderscore als functie van SL) steeds steiler wordt en het dynamisch bereik kleiner. Rond de laagste frequenties waarbij windturbinegeluid waarneembaar is, rond 30 - 50 Hz, is de dynamiek zeer klein, 15 - 25 dB. Dat betekent dat bij slechts een geringe overschrijding van de gehoordrempel de hinder extreem kan toenemen.



Figuur 9: Hindertoename boven de gehoordrempel voor lage frequenties. Oorspronkelijke⁵⁵ SPL-curve geconverteerd naar SL (niveau boven gehoordrempel).

Op basis van deze gegevens kan hinder voor SL waarden (waarnemingsniveau) bij lage frequenties worden uitgedrukt in een equivalent hinderniveau (H_{eq}) bij 1000 Hz. Zo blijkt hinder bij 80 Hz / 20 dB(SL) overeen te komen met een hinderniveau van $H_{eq} = 40$ dB SL bij 1000 Hz.

Hinder bij 50 Hz / 20 dB(SL) is equivalent aan 55 dB(SL) bij 1000 Hz. Bij 31 Hz is de hinder reeds maximaal bij 15 dB SL

In de 'A'-weging is 1000 Hz de centrale frequentie en zijn de dB(SL) en dB(A) waarden vrijwel gelijk. De H_{eq} voor 1000 Hz wordt daarom genoteerd als: $H_{eq} = x$ dB(A), mede omdat in 'windturbineland' dB(A) meest wordt gebruikt en begrepen.

Aan de hand van de dynamische laagfrequent hinderanalyse kan nu ook het effect van de laagfrequent hinderperceptie in de gemeten immismisspectra inzichtelijk worden gemaakt.

Voor zowel de Nederlandse als Duitse windparken blijkt de laagfrequent hinder vergelijkbaar met ‘gewone’ middenfrequent hinder van 50 tot 70 dB(A). Dit is zeer ernstige hinder en bevestigt klachten van omwonenden.

7.4 Conclusies laagfrequent geluid

- ◆ Wetenschappelijke akoestische modellen voor windturbines wijzen op een grote onnauwkeurigheid van de gangbare ISO-9613 methode voor lage frequenties. Dit wordt door veldmetingen bevestigd.
- ◆ Piekwaarden van laagfrequent turbine geluid zijn goed waarneembaar, zowel op korte als op grotere afstand. Zij leiden tot aantoonbaar ernstige hinder.
- ◆ Bij laagfrequent geluid neemt de hinder reeds vlak boven de gehoordrempel aanzienlijk sneller toe dan voor de middenfrequenties. Piekwaarden en AM hebben dus grote impact.
- ◆ A-gewogen normering is voor bescherming tegen laagfrequent hinder niet toereikend.
- ◆ Laagfrequent normering voor immissieniveaus is noodzakelijk ter bescherming tegen vaak zeer lokaal optredende hinder.

8 Tonaliteit

Bij sommige windturbines kunnen, vooral voor de lage frequenties, onvoorziene tonale effecten van het turbinegeluid optreden welke tot op enkele kilometers hoorbaar zijn⁵⁶ Deze kunnen (deels) het gevolg zijn van geluidbeperkende maatregelen.⁵⁷ Deze tonaliteit resulteert in extra hinder, veelal equivalent met een verhoging van geluidniveau van ca. 5-7 dB(A).³⁷

De Nederlandse overheid wil in nieuwe normering voor windturbinegeluid ook voor tonaliteit een aparte regeling treffen. Omdat de mate van eventuele tonaliteit door lokale omstandigheden wordt beïnvloed is het van belang dat de normering behalve voor de emissie ook voor immissie geldt.

9 Jaarlijkse geluidsbelasting Lden

Voor de berekening van Lden moet onderscheid gemaakt worden tussen een *emissie*Lden, dus Lden ter plekke van de windturbine en de *immissie*Lden ter plekke van de woonomgeving.

9.1 LdenE

LdenE is de jaargemiddelde emissie en wordt berekend op basis van het bronvermogen van de windturbine. Het bronvermogen is windafhankelijk, voor elke frequentie wordt op een gestandaardiseerde wijze de geluidemissie bepaald (IEC-61400).⁶¹ In paragraaf 3.3 werden reeds de beperkingen hiervan besproken. (houdt geen rekening met mate van stabiliteit van de atmosfeer noch met de ‘zog’-effecten bij de bronmeting). Vooralsnog is de gehanteerde methode de best mogelijke maar er moet rekening worden gehouden met de aanzienlijke onvolkomenheden hiervan bij de interpretatie van berekeningen van Lden. (bijvoorbeeld: bij grotere turbulentie meer laagfrequente geluidproductie dan de brongegevens aangeven)

Jaarstatistieken voor de windsterkte (in Nederland gelukkig op ashoogte beschikbaar) geven per windsterkte aan hoe vaak deze voorkomt. Ook hier kleef een beperking aan omdat het om uurgemiddelden gaat waarbij fluctuaties en windstoten buiten beschouwing blijven. Door een

energetische sommatie van de individuele bijdragen per windsterkte wordt een jaargemiddeld bronvermogen LdenE vastgesteld.

9.2 LdenI

LdenI is de geluidbelasting door de immissie in de woonomgeving van de windturbine. Voor een berekening van LdenI moet LdenE worden gecombineerd met een berekening van de geluidsoverdracht naar de omgeving.

Eerder werd besproken hoe grillig de verspreiding van turbinegeluid verloopt. Wetenschappelijk onderzoek en veldmetingen wijzen uit dat de werkelijk optredende geluidniveaus zodanig sterk afwijken van de ISO-contourlijnen dat deze feitelijk onbruikbaar zijn. Het zijn juist de geconstateerde afwijkingen van ISO-9613 die leiden tot gebieden rond de windturbine die minder geluidbelasting ondervinden dan berekend, maar er zijn tot op grote afstand (2 – 3 km) ook gebieden waar regelmatig aanzienlijke hogere geluidniveaus verwacht kunnen worden.

Naast de onzekerheid van het algemene A-gewogen geluidniveau resulteert de geluidsoverdracht van windturbine naar immissiepunt ook in spectrale veranderingen. De geluidsoverdracht is zeer frequentie afhankelijk. Zo heeft een immissiepunt met bijvoorbeeld Lden = 41 dB(A) bij een hoge turbine een ander spectrum dan bij een lagere turbine.

LdenI kan dus niet binnen een redelijke tolerantie op basis van LdenE worden bepaald. De tolerantie voor ISO-9613-metingen bedraagt 3 dB voor een maximale emissiehoogte van 30 meter. Voor windturbines is de onzekerheid aanzienlijk hoger, hetgeen LdenI op basis van ISO-9613 onbruikbaar maakt voor normering of planningsdoeleinden.

Op basis van de stand der wetenschap is het evenmin mogelijk op andere wijze een jaarlijks gemiddeld immissieniveau vast te stellen dat rekening houdt met lokale en meteorologische variabelen. De feitelijke situatie is ook voor de meest geavanceerde wetenschappelijke modellen te complex.

Dit betekent dat LdenI geen bruikbare maat is voor normering.

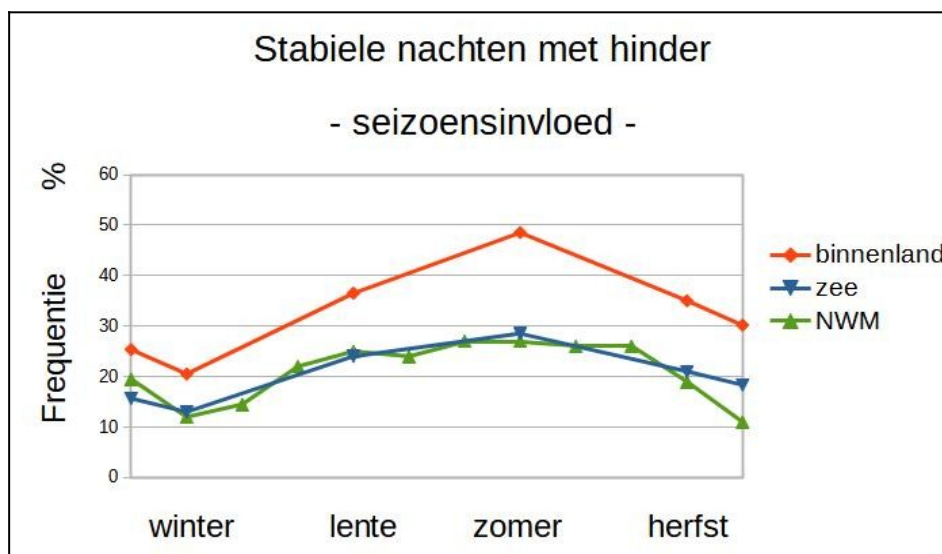
In het buitenland wordt dit probleem veelal omzeild door niet de Lden maar een maximaal immissie-niveau Aeq als normmaat te nemen. Dit biedt de mogelijkheid plaatselijk grote hinder die op basis van de ISO-9613 methodiek onderschat of niet verwacht wordt, toch te vermijden.

9.3 Lden en seizoensinvloeden

De belangrijkste gevolgen van geluidhinder die zowel in de literatuur als ook in de klachten van omwonenden van windparken genoemd worden, hebben betrekking op slaapproblemen en (secundaire) stressklachten.^{21,45,62,43} Slaapproblemen kunnen optreden bij aanzienlijke wind gedurende (een deel van) de avond en nacht. Nachtelijke wind op turbinehoogte kan optreden bij harde wind zoals bijvoorbeeld bij depressies. Dan is er weinig verschil tussen dag en nacht. Bij grote stabiliteit van de atmosfeer door sterke afkoeling in de nacht, ontstaat er meestal in de hogere luchtlagen aanzienlijke wind waarbij de windturbine op vol vermogen draait. De jaarverdeling van frequentie van voorkomen van deze stabiele nachten geeft dus inzicht in hoeverre de geluidbelasting gedurende het jaar varieert.

In figuur 10 is de frequentie van nachten met grote stabiliteit voor de verschillende seizoenen weergegeven voor de kustregio en het binnenland.⁸ Ook is weergegeven de verdeling van NWM over het jaar.⁹ De gegeven NWM verdeling geldt voor Cabauw in west-midden Nederland. Volgens de gehanteerde definitie van het KNMI komen NWM voor bij 'extreme' stabiliteit. De curve voor NWM ligt dus iets lager dan de curve voor 'grote' stabiliteit. Daarmee is het begrijpelijk dat de

NWM-curve voor het midden van Nederland samenvalt met de curve voor 'grote' stabiliteit aan de kust.



Figuur 10: Seizoensinvloed voor ernstige hinder: frequentie van nachten met stabiele atmosfeer en NWM (zeer stabiel). Bron:^{8,9}

De gegevens wijzen op grote seizoens- en klimatologische invloeden. Dit betekent dat een jaarmiddeling geen recht doet aan de seizoengebonden geluidbelasting en niet wordt voldaan aan het uitgangspunt dat de geluidbelasting door het jaar heen min of meer stabiel is. Daarmee is toepassing van de Lden-systematiek niet opportuun.

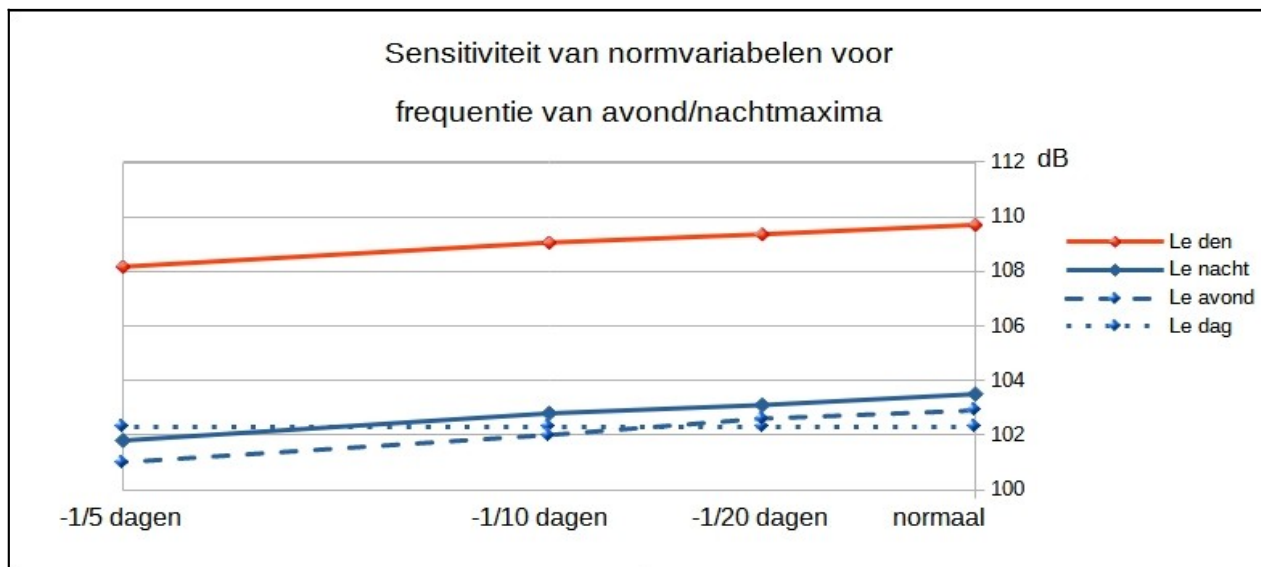
9.4 Lden en het (dis)continue karakter van windturbinegeluid

De frequentie van voorkomen van zowel een stabiele als een onstabiele atmosfeer varieert niet alleen over de seizoenen. Ook binnen de seizoenen kunnen deze voor hinder ongunstige omstandigheden in zeer wisselende frequentie optreden. Soms dagen lang maar dit kan worden afgewisseld door een langere periode van weinig of geen wind, dus zonder hinder.

De vraag is of een jaargemiddelde normering met Lden/Lnacht sensitief genoeg is om een maat te kunnen zijn voor deze sterk wisselende hinder. De sensitiviteit is de mate waarin Lden varieert bij variërende invloed van windmaxima. Deze sensitiviteit kan bepaald worden door bij berekeningen van Lden/Lnacht de bijdragen van avond/nacht windmaxima stapsgewijs te verminderen. Deze berekening is uitgevoerd voor een windturbine met een ashoogte van 149 meter, in het midden van het land aan de hand van KNMI windgegevens op ashoogte en de geluidspecificaties van de fabrikant.⁶³ Ter vereenvoudiging is er van uitgegaan dat windmaxima optreden over de hele avond- en nachtperiode tussen 19.00 uur en 07.00 uur.

De berekeningen voor Lden gaan, zoals gebruikelijk in Nederland, uit van het ISO-9613 model. De beperkingen hiervan worden hier buiten beschouwing gelaten. De sensitiviteit van Lden kan daarom berekend worden aan de hand van de emissiewaarden, LdenE.

In figuur 11 is L_{den} weergegeven voor verschillende frequenties van voorkomen van de nachtelijke windmaxima (1x per 5, 10, 20 dagen) op een afstand van de turbine waarvoor $L_{den} = 47$ dB, de huidige norm. Te zien is dat zowel L_{den} als L_{avond} en L_{nacht} zonder windmaxima vrijwel onveranderd blijven ten opzichte van de berekening van L_{den} inclusief alle windmaxima. De sensitiviteit voor windmaxima die gedurende de hele avond en nacht optreden is kleiner dan 2 dB. Aan een normvariable mag de eis gesteld worden dat deze minimaal regelmatig voorkomende, korter durende, nachtelijke verstoringen van 1-2 uur 'detecteert'. De sensitiviteit hiervoor van L_{den} blijkt echter nihil.



Figuur 11: Afname van de jaargemiddelde geluidsbelasting door het vervangen van het 12 uurs avond/nacht windmaximum door windstilte eens per gemiddeld 5, 10, 20 dagen.

Het vrijwel horizontale verloop laat zien dat L_{den} ongevoelig is voor incidentele windmaxima.

9.5 L_{den} -normering vergeleken met buitenlandse normen

Ter beoordeling van de normverschillen tussen landen moeten variabelen L_{den} en A_{eq} vergeleken worden. L_{den} is een jaargemiddelde terwijl de meeste landen een maximum voorschrijven voor het dagelijks geluid A_{eq} (gemiddeld over een kleine tijdseenheid). De normering met een A_{eq} heeft altijd betrekking op het geluidniveau ter plekke van de bewoonde omgeving, het *immissieniveau*. Bij de conversie van L_{den} naar A_{eq} of vice versa wordt echter veelal uitgegaan van de emissiewaarden L_{denE} . Zoals in dit advies besproken, is er een groot verschil tussen emissie- en immissieniveaus. Niet alleen voor het algemene niveau maar vooral wat betreft de grote afwijkingen in de focuszone. Een goede conversie tussen L_{den} en A_{eq} kan dus alleen plaatsvinden indien wordt uitgegaan van de L_{denI} . Omdat hiertoe het gereedschap ontbreekt is een goede conversie niet mogelijk. Met andere woorden: bij de gangbare conversie van L_{den} en A_{eq} wordt de grillige geluidverspreiding buiten beschouwing gelaten. Dit resulteert in een grote onderschatting van de werkelijk optredende A_{eq} .

De Nederlandse normen liggen in gangbare vergelijkingen aan de bovenkant van de bandbreedte van buitenlandse normering.⁶⁴ Omdat in de systematiek geen rekening wordt gehouden met de werkelijk optredende veel hogere geluidsniveaus A_{eq} in focusgebieden, zijn de Nederlandse normen echter aanzienlijk ruimer.

9.6 Conclusie jaargemiddelde geluidbelasting Lden en Lnight

- ◆ De berekening van Lden *ter plekke van de windturbine* LdenE heeft beperkte betekenis doordat de turbinespecificaties geen inzicht geven in de (grote) effecten van turbulentie en variabele windgradiënten op de geluidproductie.
- ◆ De berekening van Lden voor de immissie *op afstand van de windturbine* LdenI resulteert, in een zeer grote onzekerheidsmarge door het gebruik van de ISO-9613 berekening voor de geluidsoverdracht,
- ◆ De betekenis van Lden als dosismaat is beperkt door de ongevoeligheid voor
 1. seizoenseffecten en klimatologische omstandigheden met sterke invloed op hinder.
 2. onregelmatig voorkomende nachtelijke windmaxima
- ◆ De bij wetenschappelijk onderzoek naar geluidsoverdracht gebruikte numerieke methoden zijn niet geschikt voor de complexiteit van praktijksituaties.
- ◆ De onbruikbaarheid van Lden als dosismaat impliceert dat alleen normering van maximale immissieniveaus tot een adequate bescherming kan leiden.
- ◆ De Nederlandse normen liggen in gangbare vergelijkingen aan de bovenkant van de bandbreedte van buitenlandse normering. Rekening houdend met de werkelijk optredende geluidsniveaus Aeq in focusgebieden, zijn de Nederlandse normen echter nog aanzienlijk ruimer.
- ◆ WHO 2018: ‘ it may be concluded that the acoustical description of wind turbine noise by means of Lden or Lnight may be a poor characterization of wind turbine noise and may limit the ability to observe associations between wind turbine noise and health outcomes.’.⁴⁶

10 Validiteit van de doses-effectrelatie

Normering van windturbine geluid wordt gebaseerd op een dosis-effectrelatie, de curve die het verband weergeeft tussen geluidsniveau (dosis) en gezondheidseffecten (effect). De WHO beoordeeld hinder als een gezondheidseffect. De dosis-effectrelatie voor windturbines heeft meestal betrekking op hindermetingen. Naar de dosis-effectrelatie voor deelaspecten van windturbinegeluid zoals AM wordt eveneens onderzoek gedaan maar die wordt hoogstens gebruikt voor normering van de AM niet als hoofdvariabele van de normering.

De Nederlandse normen voor windturbinegeluid en ook de WHO aanbevelingen zijn in belangrijke mate gebaseerd op een groot Nederlands onderzoek uit 2007 en Zweeds onderzoek uit 2000 en 2005.^{45,27} Op basis van deze onderzoeken is door TNO een dosis-effectrelatie vastgesteld die het verband aangeeft tussen jaargemiddelde geluidsniveaus en de mate van hinder.²⁹ In 2018, tien jaar later, was hier echter helaas nog steeds geen vervolg op gekomen en beoordeelde de WHO de gevonden doses-effectrelaties waarop ook de Nederlandse normen zijn gebaseerd als zwak en wil er daarom geen normstelling aan verbinden.^{45,46,47} Groot onderzoek in Canada waar dezelfde methodiek voor de berekening van de ‘doses’ wordt gehanteerd (ISO-9613) wordt in Nederland vaak beoordeeld als zijnde een bevestiging van de TNO dosis-effectrelatie.^{65,66} Dit onderzoek wordt echter krachtig bekritiseerd, onder andere in verband met akoestische rekenmethode en het gebruik van over de tijd gemiddelde geluidsniveaus.⁵⁹

De ‘dosis’ bij windturbines wordt in belangrijke mate bepaald door het nachtelijk windmaximum (NWM). De avond- en nachtperiode wegen in de bepaling van Lden zwaar, de slaapverstoring is dan ook een belangrijke hinderfactor. Bij het onderzoek dat aan de basis ligt van de dosis-effect relatie van de normstelling, waren de onderzochte windturbines laag waardoor het hindereffect van

de NWM zeer beperkt was. Ongeveer de helft van de windturbines was lager dan 70 m, een hoogte waarop NWM's weinig voorkomen. Figuur 3 geeft de hoogteverdeling van de windturbines die bij het Nederlandse onderzoek betrokken waren.

Dit laat zien dat een belangrijk deel van de avond/nacht-hinder van de huidige hoge windturbines buiten de scoop van de dosis-effectrelatie valt. Bovendien waren windgegevens slechts globaal beschikbaar waardoor de bepaling van de 'doses' eveneens globaal was.

De dosis-effectcurven van de verschillende internationale onderzoeken vertonen een spreiding van ongeveer 10 dB voor het niveau van 10% ernstige-hinder. Ook deze spreiding laat zich, naast klimatologische verschillen, verklaren door het mechanisme van de Lden die is samengesteld uit verschillende doseszones (focusgebieden). Dit sluit natuurlijk andere deelloorzaken niet uit.

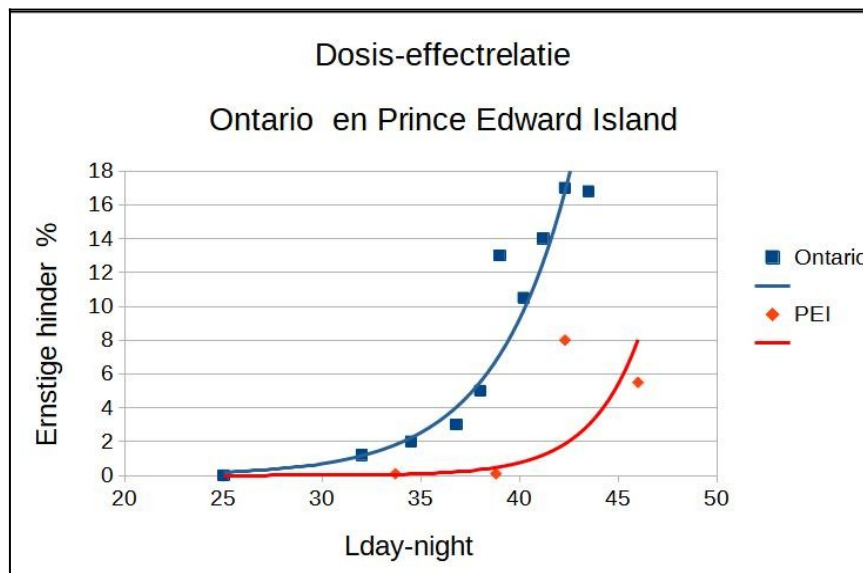
Een mooi voorbeeld is het Canada-onderzoek van Michaud. Hierbij worden de onderzoeksresultaten van twee gebieden apart gepresenteerd.⁶⁵ Het onderzoek op het vaste land (Ontario) en een eiland (Prince Edward Island: PEI) levert twee sterk afwijkende dosis-effectcurven op.

Michaud verklaart de verschillen als zijnde attitudeverschillen. De vraag is of de bevolking van deze twee locaties waarbij dezelfde methode ter bepaling van zowel dosis als effect werd gebruikt, werkelijk een verschillende attitude jegens windturbines hebben. Een andere verklaring ligt hier voor de hand.

PEI is een eiland met een zeeklimaat terwijl Ontario voornamelijk een landklimaat heeft. Evidente grote klimatologische verschillen met voor PEI aanzienlijk kleinere kansen op nachtelijke afkoeling en NWM. Deze klimatologische verschillen zijn terug te zien in de dosiseffect-relatie en hinderpatronen. In figuur 12 zijn de beide curven weergegeven. In Ontario is er bij een veel lager niveau en tot op grotere afstand ernstige hinder. Dit is te begrijpen gezien de onderschatting van geluidniveaus door ISO-9613 bij NWM. Vermoedelijk speelt ook de heftiger AM bij nachtelijke afkoeling hier een rol.

Er zijn meer indicaties voor klimatologische invloeden. Zo werken in Finland windturbines slechts 10 % van de tijd op vol vermogen.⁶⁷ In midden Nederland functioneert een turbine met ashoogte van 150 m gedurende 50 % van de tijd op vrijwel maximaal vermogen. In Nederland zijn daarvoor inmiddels nauwkeurige windstatistieken voorhanden. Bij vrijwel alle gerapporteerde studies is dit niet het geval.

Al deze klimatologische verschillen hebben gevolgen voor de geluidproductie en de verspreiding van windturbinegeluid en beïnvloeden daarmee de dosis-effectmetingen. Ook de invloed van de turbinehoogte op de geluidverspreiding en dus de 'dosis', blijft bij ISO-9613 berekeningen en dus bij de dosis-effectrelatie, buiten beschouwing.

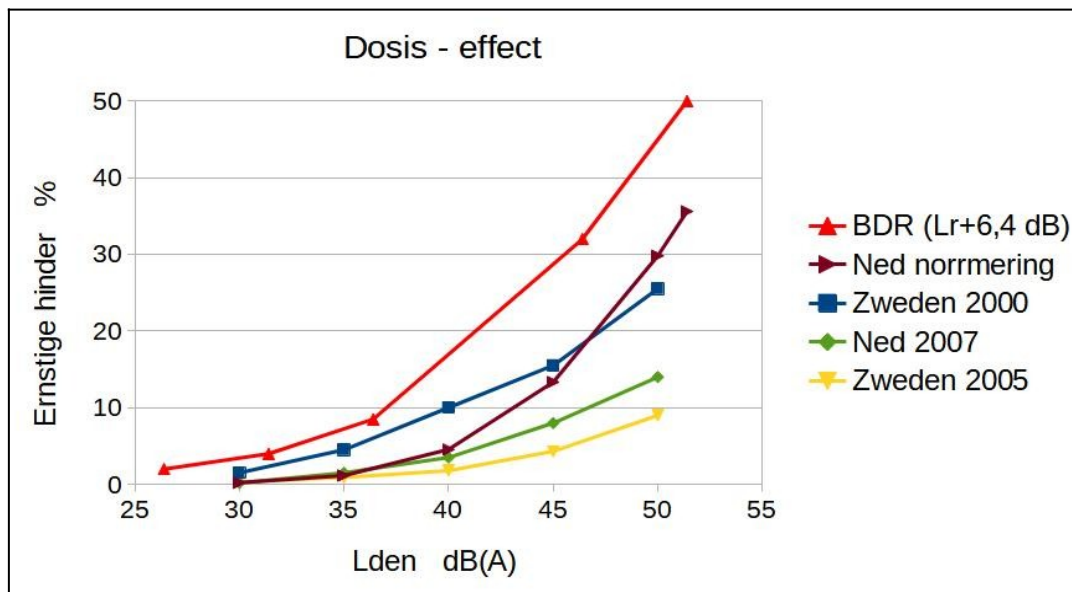


Figuur 12: Dosis-effectrelatie *landklimaat* en *zeeklimaat*.
(Ontario en Prince Edward Island, Canada). Bron:⁶⁵

Recent Duits onderzoek lijkt vooralsnog de enige epidemiologische dosis-effectstudie waarbij moderne turbines van 140 meter ashoogte betrokken zijn.

Bij vijf windparken verspreid over het land werden immissieniveaus gemeten tussen 800 en 1500 meter en bij 468 respondenten vragenlijsten afgenomen.³⁴

In figuur 13 is de dosis-effectrelatie gegeven van het Duitse onderzoek, ter vergelijking zijn ook de curven van het Nederlands- en een Zweeds onderzoek alsmede de hierop gebaseerde Nederlandse norm weergegeven. De verschillen zijn indrukwekkend. Het blijkt dat de 10% hinder reeds optreedt bij $L_{den} = 37$ dB(A), dat is ca. 10 dB lager dan bij het Nederlandse onderzoek. Op het niveau van de Nederlandse norm van $L_{den} = 47$ dB(A) bedraagt het aantal ernstig gehinderden 30 %. In het Duitse onderzoek wordt de gemiddelde houding van respondenten jegens windturbines als positief omschreven. Het hoge hinderpercentage lijkt dus niet verklaard door een sterkere negatieve attitude. De uitkomst van het Duitse onderzoek ondersteunt de hypothese dat verschillen in dosis-effectrelaties niet zozeer door verschillen in *community tolerance* worden bepaald maar door verschillen in de feitelijke doses ten gevolge van de beperkingen van de ISO-9613 metingen waardoor, onder andere, turbinehoogte, klimatologische- en omgevingsverschillen niet tot uiting komen.



Figuur 13: Dosis-effectrelatie van Nederlands (2007) en Zweeds (2000, 2005) onderzoek waarop de Nederlandse normering is gebaseerd en Duits (2022) onderzoek. Bron: ^{27,29,34,46}

10.1 Conclusies dosis-effectrelatie

- ◆ de validiteit van de Nederlandse doses-effectrelatie is onvoldoende door(dat):
 - De slechts zeer globale bepaling van de ‘doses’ t.g.v. de beperkingen van het rekenmodel en het ontbreken van windgegevens bij de betrokken turbines.
 - De geluidoverdracht van moderne hoge windturbines is onvergelijkbaar met de ‘oude’ turbines van gemiddeld 70 meter hoogte. Er is een groot verschil in afbuigingsverschijnselen. Ook de invloed van de belangrijke nachtelijke windmaxima rond 150 meter hoogte is zeer afhankelijk van de turbinehoogte.
 - De slechts zeer globale bepaling van het ‘effect’ door het klein aantal respondenten in het relevante gebied rond de normwaarden Lden en de nachtnorm Lnight, van respectievelijk 47 en 41 dB
- ◆ De lokale geluidbelasting LdenI wordt veelal gebaseerd op een jaargemiddelde *emissie* LdenE die aan de hand van een vereenvoudigde ISO-9613 wordt omgerekend naar LdenI. Deze methodiek heeft grote tekortkomingen.
- ◆ Door de grillige verspreiding van het turbinegeluid is de dosis-effect relatie feitelijk een samenstelling van de curven voor gebieden waar de ISO-1963 respectievelijk deels te laag en deels te hoog voorspelt.
- ◆ Voor de waarden van Lden waarvoor de ernstige hinderprevalentie 10 % (Nederland 2007: 47 dB(A)) bedraagt, bestaan aanzienlijke focusgebieden met een zeer hoge ernstige hinderprevalentie van zeker 30%. De turbinehoogte speelt hierbij een belangrijke rol.
- ◆ Een recent door de Duitse overheid bepaalde dosis-effectrelatie wijst op een factor 3 hogere hinderscore in vergelijking met Nederland. De Nederlandse hinderscore van 10 % wordt reeds bereikt bij Lden = 37 dB(A). Dit is vooralsnog de enige dosis-effectrelatie die is gebaseerd op hoge windturbines en metingen voor de dosesbepaling.

- ◆ De spreiding van dosis-effectcurven tussen diverse internationale studies laat zich grotendeels verklaren door de beperkingen van de ISO-9613 berekening die geen rekening houdt met locale (klimatologische) verschillen en vormen geen bewijs voor verschillen in niet-auditieve hinderfactoren tussen gemeenschappen (community tolerance).
- ◆ Evenals de geluidbelasting is ook de aanwezigheid van AM zeer ongelijk verdeeld in de omgeving van windturbines. Deze wordt niet door ISO-9613 voorspeld en is niet eenduidig gerelateerd aan Lden doch is zeer bepalend voor ervaren hinder. Een dosis-effectrelatie gebaseerd op Lden is dus onvoldoende maatgevend voor de te verwachten hinder.

Veel dank gaat uit naar Jan van Muijlwijk voor zijn niet aflatende inzet bij de geluidmetingen aan Windpark N33 en zijn bereidheid deze ter beschikking te stellen voor verdere analyse.

11 Referenties

- 1 VALCOUSTICS CANADA LTD
Sound Propagation Modelling for Offshore Wind Farms Technical Report. June 2016 , opdracht Ministry of the Environment and Climate Change at:
<https://www.researchgate.net/publication/335611405>
- 2 **ISO 9613-2:**
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/20649/f3dc22f932b648bdbfb5fea04fe41f66/ISO-9613-2-1996.pdf>
- 3 Deshmukha S, Bhattacharyaa S , Jainb A , Paulb a R.
Wind turbine noise and its mitigation techniques: A review. 2nd International Conference on Energy and Power, ICEP2018, 13-15 December 2018, Sydney, Australia / Energy Procedia 160 (2019) 633–640 www.sciencedirect.com
- 4 RIVM-rapport **KENNISBERICHT Geluid van windturbines**, met bijlagen 2015
<https://www.rivm.nl/documenten/kennisbericht-geluid-van-windturbines-bijlagen-versie-10-pdf-document-678-kb>
- 5 Conrady K, Bolin K, Sjöblom A, Rutgersson A.
Impact of low-level wind maxima below hub height on wind turbine sound propagation. Wind Energy. 2020;23:1767–1775. <https://doi.org/10.1002/we.2517>
- 6 Bolina K, Boué M.
Long range sound propagation over a sea surface. The Journal of the Acoustical Society of America · November 2009 DOI: 10.1121/1.3238236
- 7 Makarewicz R, Gołębiewski R
The Influence of a low level jet on the thumps generated by a wind turbine. 2019, [Renewable and Sustainable Energy Reviews](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.022) 104:337-342. DOI:[10.1016/j.rser.2019.01.022](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.022)

- 8 Berg F vd.
Wind turbines verschil dag en nacht. maart 2004. Geluid
- 9 Baas P, Bosveld F C, Klein Baltink H., Holtslag A A M.
A Climatology of Nocturnal Low-Level Jets at Cabauw. Royal Netherlands Meteorological Institute, American Meteorological Society. 2009. DOI: 10.1175/2009JAMC1965.1.
- 10 Berg G P vd.
Wind gradient statistics up to 200 m altitude over flat ground. Proceedings First International Meeting on Wind Turbine Noise: Perspectives for Control, Berlin. 2005
- 11 Sedaghatizadeh N, Arjomandi M, Cazzolato B, Kelso R.
Wind farm noises: Mechanisms and evidence for their dependency on wind direction. Renewable Energy 109 (2017) 311e322
- 12 Barlas E, Zhu WJ, Shen WZ, Dag KO, Moriarty P.
Consistent modelling of wind turbine noise propagation from source to receiver. Journal of the Acoustical Society of America. 2017; 142:3297-14
- 13 Kayser B, Ecoti re D, Gauvreau B.
Influence de la turbulence atmosph rique sur la propagation du bruit des  oliennes. 16e Congr s Fran ais d'Acoustique Marseille april 2022,
<https://www.researchgate.net/publication/360167524>
- 14 Colas J, Emmanuelli A, Dragna D, Cott  B, Stevens R, Burgers J M.
Exploring the effect of wind farm flow on wind turbine noise propagation through numerical simulations. 10th International Conference on Wind Turbine Noise, Dublin - 21st to 23rd June 2023
- 15 Bolin, K, Conrady K, Karasalo, I., S  blom, A.
An investigation of the influence of the refractive shadow zone on wind turbine noise. Journal of the Acoustical Society of America, 148(2), EL166-EL171. 2020.
- 16 Barlas E, Wu KL, Zhu WJ, Port -Agel F, Shen WZ.
Variability of wind turbine noise over a diurnal cycle. Renewable Energy. 2018;126
- 17 Heimann D.
Modelling sound propagation from a wind turbine under various atmospheric conditions. Meteorologische Zeitschrift.2018;Vol.27:265–275
- 18 Kayser B, Gauvreau B, Ecoti re D, Mallet V.
Calculation of wind turbine noise uncertainty for downwind conditions. 9th int conf on WTN, mei 2021.
- 19 Wilson D K.
The sound-speed gradient and refraction in the near-ground atmosphere. Journal of the Acoustical Society of America. 2003;113:750-8

- 20 Barlas E, Zhu WJ, Shen WZ, Dag KO, Moriarty P.
Consistent modelling of wind turbine noise propagation from source to receiver. Journal of the Acoustical Society of America. 2017; 142:3297-14
- 21 Hansen C, Hansen K.
Recent Advances in Wind Turbine Noise Research. Acoustics. 2020; 171–206
- 22 Nguyen PD, Hansen KL, Zajamsek B, Catcheside P, Hansen C H.
Multi-input model uncertainty analysis for long-range wind farm noise predictions. Elsevier, 2022 [ter perse]
- 23 Cheinet S, Cosnefroy M, Königstein F, Rickert W, Christoph M, Collier SL, Dagallier A, Ehrhardt L, Ostashev VE, Stefanovic A, Wessling T, Wilson DK.
An experimental study of the atmospheric-driven variability of impulse sounds. J. Acoust. Soc. Am. 2018;144 (2).
- 24 Barlas E, Wu KL, Zhu WJ, Porté-Agel F, Shen WZ.
Variability of wind turbine noise over a diurnal cycle. Renewable Energy. 2018;126.
- 25 Könecke S, Hörmeyer J, Böhne T, Rolfes R
A new base of wind turbine noise measurement data and its application for a systematic validation of sound propagation models. Wind Energy Science · April 2023
[DOI: 10.5194/wes-8-639-2023](https://doi.org/10.5194/wes-8-639-2023)
- 26 Mascarenhas D, Cotte B, Doare O, Ecotiere D, Guillaume G, Gauvreau B.
Wind turbine noise modeling including aeroacoustic sources and propagation effects : Comparison against field measurements. Proceedings Inter.Noise 2022, Glasgow.
- 27 Berg F, Pedersen E, Bouma J, Bakker R.
Project WINDFARMperception Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents. UMCG. 2008
- 28 KNMI Cabau. <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/lowlevel-jets-boven-cabauw>
- 29 Janssen SA, Vos H, Eisses AR.
Hinder door geluid van windturbines. Dosis-effectrelaties op basis van Nederlandse en Zweedse gegevens. TNO Bouw en Ondergrond. Delft. 2008;86.
- 30 Pedersen E, Persson Waye K.
Perception and annoyance due to wind turbine noise—adose—response relationship. J. Acoust. Soc. Am. 116 (6), December 2004
- 31 Kristy L. Hansen K L, Nguyen P, Micic G, Lechat B, Catcheside P, Zajamsek B.
Amplitude modulated wind farm noise relationship with annoyance: A year-long field study. The Journal of the Acoustical Society of America · August 2021
DOI: 10.1121/10.0005849

- 32 Schäffer B, Pieren R, Schlittmeier SJ, Brink M.
Effects of Different Spectral Shapes and Amplitude Modulation of Broadband Noise on Annoyance Reactions in a Controlled Listening Experiment. International Journal of Experimental Research and Public Health. 2018;15:1029
- 33 Cotté B.
Coupling of an aeroacoustic model and a parabolic equation code for long range wind turbine noise propagation. Journal of Sound and Vibration. 2018;026
(www.researchgate.net/publication/324693937)
- 34 Schmitter S, Alaimo Di Loro A, Hemmer D, Schreckenber D, Großarth S, Pörschmann C, Kühner T.
Final report Noise effects of the use of land-based wind energy. Ressortforschungsplan of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection 2022, German Environment Agency (Umweltbundesamt)
- 35 Hansen KL, Nguyen P, Zajamsek B, Catcheside P, Hansen CH.
Prevalence of wind farm amplitude modulation at long-range residential locations. Journal of Sound and Vibration. 2019
- 36 Nguyen P D, Hansen K L, Catcheside P, Hansen C H, Zajamsek B.
Long-term quantification and characterisation of wind farm noise amplitude modulation, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109678>
- 37 Lotingha M, Lewis T, Powlson J, Beery B.
A review of noise guidance for onshore wind turbines. Project Report Department for Business, Energy & Industrial Strategy, Bristol, may 2023
- 38 **Geluidsonderzoek windpark Spui ten behoeve van de omgevingsdialoog.**
M+P. Provincie Zuid Holland. 22.02.1 | 3 mei 2023
- 39 Lontinga M.
Subjective responses to wind turbine noise amplitude modulation: pooled analysis of laboratory listening studies and synthesis of an AM character rating penalty.
Proceedings 9th International Conference on Wind Turbine Noise. 2021
- 40 Virjonen P, Hongisto V, Radun J.
Annoyance penalty of periodically amplitude-modulated wide-band sound. Journal of the Acoustical Society of America. 2019;146:4159
- 41 Adeogun C O O.
A review of amplitude modulation noise from wind turbines.
www.academia.edu/73412087. 2022
- 42 Schäffer B, Pieren R, Schlittmeier SJ, Brink M.
Effects of Different Spectral Shapes and Amplitude Modulation of Broadband Noise on Annoyance Reactions in a Controlled Listening Experiment. International Journal of Experimental Research and Public Health. 2018;15:1029

- 43 Ara J, Alves J, Neto Paiva F, Torres Silva L, Remoaldo P.
Low-Frequency Noise and Its Main Effects on Human Health—A Review of the Literature between 2016 and 2019. *Applied Sciences*, Volume 10, Issue 15 2020
- 44 Vanhollebeke F.
Dynamic analysis of a wind turbine gearbox Towards prediction of mechanical tonalities. Dissertatie KU Leuven, 2015.
- 45 World Health Organization Regional Office for Europe.
Environmental noise guidelines for the European region. WHO Regional Office for Europe: Copenhagen, Denmark. 2018
- 46 **WHO citation:** pagina 86
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/279952/9789289053563-eng.pdf?sequence=1>,
- 47 Guski R, Schreckenberg D, Schuemer R.
Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. International Journal of Experimental Research and Public Health. 2017;14:1539
- 48 Kayser B, Gauvreau B, Ecoti re D, Mallet V.
Wind turbine noise uncertainty quantification for downwind conditions using metamodeling. Journal of the Acoustical Society of America. 2022;151:390-401
- 49 Peutz.
Onderzoek naar laagfrequent geluid ten gevolge van windturbines. Onderzoek in het kader van het planMER Windturbinebepalingen Leefomgeving Rapportnummer F 22656-2-RA-001 d.d. 20 januari 2023.
- 50 LBP Sight.
Rapport Windpark De Drentse Monden en Oostermoer, Akoestisch onderzoek. R068502aa.22CH7TH.md , Gemeente Aa en Hunze en gemeente Borger-Odoorn
- 51 M+P raadgevende ingenieurs.
Geluidsonderzoek windpark Spui ten behoeve van de omgevingsdialoog. Rapportnummer M+P.PZH.22.02.1. Provincie Zuid-Holland
- 52 Jan van Muijlwijk.
Resultaat metingen T0 en T1 Windpark N33. gemeente Veendam. Juni 2021
- 53 Vercammen M.
Criteria for low frequency noise. 19th International congress on acoustics, Madrid, 2-7 september 2007
- 54 Passchier-Vermeer W.
Beoordeling Laagfrequent Geluid in woningen. TNO-rapport 98.028. 1998

- 55 Alamira MA, Hansena KL, Zajamsek B, Catcheside P.
Subjective responses to wind farm noise: A review of laboratory listening test methods. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019;114:109317
- 56 Hansen K; Zajamšek B, Hansen C.
Comparison of the noise levels measured in the vicinity of a wind farm for shutdown and operational conditions. Proceedings Internoise 2014, Melbourne Australia
- 57 Palmer W K G.
Confirming Tonality at Residences Influenced by Wind Turbines. Journal of Energy Conservation. 2020;1:13-44
- 58 **Notulen agendapunt 4 inzake Windpark Spui, Provincie Zuid Holland**
https://pzh.notubiz.nl/document/13758319/2/Concept_besluitenlijst_EE_17_januari_2024,
- 59 Krogh C M, Dumbrille A, McMurtry R Y, James R, Rand R W, Nissenbaum M, Aramini J J, Ambrose S E.
Health Canada's Wind Turbine Noise and Health Study—A Review Exploring Research Challenges, Methods, Limitations and Uncertainties of Some of the Findings. Open Access Library Journal, 5: e5046. 2018.<https://doi.org/10.4236/oalib.1105046>
- 60 Kamp van I, Berg van den G P.
Gezondheidseffecten van windturbinegeluid. RIVM-rapport 2020-0214
- 61 Klug H.
IEC-NEWS: Power Performance and Acoustic Noise DEWI Magazin Nr. 28, Februar 2006
- 62 Rivm 2021:
<https://www.rivm.nl/nieuws/nederlandse-versie-literatuurstudie-gezondheidseffecten-windturbines>
- 63 **Fabrieksspecificatie geluid Vesta v136 3,6 mW:**
Toelichting omgevingsvergunning beperkte milieutoets
4._R068362ab.18AKCNR.jwi_11_001, blz 260, Gemeente Houten, juni 2022 .
- 64 Koppen E.
Nederlandse geluidsnormen in internationaal perspectief. Windnieuws. 2015;4:10-13
- 65 Michaud D S et al.
Personal and situational variables associated with wind turbinenoise annoyance. J. Acoust. Soc. Am. 139 (3), March 2016
https://www.researchgate.net/publication/299546257_Personal_and_situational_variables_associated_with_wind_turbine_noise_annoyance
- 66 Keith S E et al.
Wind turbine sound pressure level calculations at dwellings (Canada). J Acoust Soc Am 139, 1436–1442 (2016).<https://doi.org/10.1121/1.4942404>

- 67 Radun J, Maula H, Saarinen P, Keränen J, Alakoivu R, Hongisto V.
Health effects of wind turbine noise and road traffic noise on people living near wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews 157 (2022) 112040
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112040>